

O SISTEMA, UNIDADE LÓGICA DE REFERÊNCIA DOS ESTUDOS ESPELEOLÓGICOS

1
Luis Enrique SANCHEZ

Recebido em fevereiro/1988, aceito em julho/1988

Abstract

Speleologists have been using descriptive terms such as "complex", "network", "set", and "system" to mean interconnected cave sets. They result from progress in cave exploration, whose "product" is ever bigger caves as a consequence of new passage discoveries linking former cavities. These terms, however, seldom express an integrated view of the cave in its context; their origin is often a fragmentary concept in which caves "grow" by collage of new parts.

On the other hand, Brazil karst regions have been classified according to a geographic criterium into speleological provinces, which are sub-divided into speleological districts, which, in turn, are made up of speleological systems. A province is mainly dependent upon large geologic features, while into the same lithostratigraphic unit different districts can be defined, which show the discontinuity of karst processes along a geologic unit. In a district, percolating waters create hydrological units called speleological systems, composed of both human-size and small voids. A system thus is the most conspicuous result of karst processes. Moreover, as underground fauna live not only in large galleries, but also colonize small voids, the system is the biotope of the hypogean ecosystem.

Some hydrogeologists, through the application of a systemic approach to karst aquifers have defined karst systems and are thus able to study their chemical, isotopic, thermic, and biological responses. A global vision seems necessary for a better understanding of karst phenomena. Geomorphologists studying the relationships of the karst with its non karstic surroundings have reached similar conclusions. This approach provides a framework for an interdisciplinary study of karst, what is of paramount importance to the management of karst resources and the design of a conservation strategy.

As a conclusion it is suggested that the subject of reference in speleological studies should not be the cave, but the system.

Keywords: speleological system, karst system, speleological provinces.

1 Escola Politécnica da USP - PMI. Av. Prof. Mello Moraes, 2423, 05508, São Paulo, SP

Têrmos como conjunto, complexo, rede e sistema têm sido usados quase indistintamente para designar conjuntos de cavernas interconectadas entre si. Tais termos foram cunhados como resultado do avanço da exploração espeleológica, que "produz" cavernas cada vez maiores como resultado da descoberta de passagens ligando cavidades anteriormente conhecidas e conotam uma idéia fragmentária do carste, concebido como uma coleção de partes constituintes.

No sentido inverso, ou seja, partindo de ordens de grandeza maiores para as menores, uma classificação de províncias, distritos e sistemas espeleológicos foi proposta para as regiões cársticas do Brasil; nesta, um sistema é a unidade mais conspícua resultante dos processos cársticos e oferece a vantagem de ser consistente com a teoria geral dos sistemas. Ademais, o sistema espeleológico constitui o biótopo do ecossistema hipógeo.

Alguns hidrogeólogos, estudando o carste sob um ponto de vista sistêmico, têm analisado sua resposta química, isotópica, térmica e biológica, mostrando as vantagens de uma visão global do carste. Esta perspectiva mostra que o aquifero cárstico não pode ser considerado como um meio fissurado homogêneo, mas que os canais de drenagem são caracterizados por uma nítida hierarquização de montante a jusante, como as redes hidrográficas de superfície, ocasionando uma heterogeneidade observável a todas as escalas de tempo e espaço.

Uma visão global parece necessária para uma melhor compreensão dos fenômenos cársticos e para seu estudo interdisciplinar. Ela é de fundamental importância para o manejo e conservação de regiões cársticas.

Estas observações levam à conclusão de que a unidade lógica de referência dos estudos espeleológicos deve ser o sistema e não a caverna.

Palavras-chave: sistema espeleológico, sistema cárstico, províncias espeleológicas.

A nomenclatura espeleológica brasileira foi assunto de discussão em congressos nacionais de espeleologia no início dos anos setenta e uma terminologia oficial foi proposta, bem como critérios e definições de termos espeleométricos. Dois deles são o ponto de partida para a discussão que se segue.

Trata-se dos termos conjunto (como conjunto São Mateus-Imbira) e complexo (como complexo das Areias) que, a meu ver, não só não trazem nenhuma precisão suplementar como dificultam o entendimento dos fenômenos cársticos. Um terceiro termo de uso corrente é sistema, que será aqui considerado como o mais adequado. O objetivo deste artigo é explicar as razões desta preferência.

Cavernas e sistemas

A atividade científica e esportiva do espeleólogo desenvolve-se num espaço subterrâneo natural que é, por princípio e necessariamente, penetrável pelo homem, ou se preferirem, "permeável ao espeleólogo". Este espaço é habitualmente denominado caverna. (2)(3)

2 A necessidade ou não da existência de zona afótica não nos interessa nesta discussão.

3 Subentende-se que por métodos outros que a observação direta a atividade científica espeleológica possa ser desenvolvida num espaço não penetrável pelo homem.

Tanto para o desempenho de atividades científicas quanto para a prática esportiva os espeleólogos perceberam que é absolutamente necessário referir-se ao espaço exterior à caverna, e que a exploração subterrânea torna-se mais eficaz se a caverna é posicionada em relação ao relevo externo, ao sistema de drenagem, à estrutura geológica do maciço rochoso e a outras cavidades deste maciço. Estas atividades são integradas para a escolha de objetivos prioritários de prospecção e exploração.

Por outro lado, geomorfólogos e hidrogeólogos consideram a caverna como um componente de um conjunto maior, o carste, que alguns dividem em exocarste e endocarste, se bem que por não se dedicarem à exploração espeleológica, estes pesquisadores tenham frequentemente negligenciado o componente endocárstico.

Inversamente, os espeleólogos nem sempre deram a devida importância ao conjunto exocárstico, isolando na prática a caverna para efeitos de estudos espeleogenéticos, espeleoclimáticos, bioespeleológicos, etc. (AB'SABER, 1979).

Esta referência ao meio externo levou alguns pesquisadores a classificar as áreas de ocorrência de fenômenos cársticos e a situá-las num contexto geográfico de ordem de grandeza superior. (Emprego aqui o termo ordem de grandeza no sentido de CAILLEUX e TRICART, 1956 e TRICART, 1965.)

No Brasil, esta atividade deu origem a um modelo onde três ordens de grandeza se sucedem com o intuito de sistematizar o estudo da repartição das cavernas no território nacional e classificar as diversas áreas favoráveis à espeleogênese. E o modelo província-distrito-sistema espeleológico (KARMANN e SANCHEZ, 1979).

Aparentemente a proposição encontrou acolhida favorável por parte dos espeleólogos, a julgar pela referência frequente em trabalhos publicados a partir de então. Da mesma forma, tendo havido um aumento considerável na quantidade de informações sobre ocorrência de cavernas em arenitos, MARTINS (1985) propôs a extensão do conceito de província espeleológica (em sua formulação inicial restrito a ocorrências em rochas carbonáticas) a litologias areníticas, sendo a província espeleológica da Serra Geral a primeira delas. Outra província espeleológica arenítica é a do Alto Rio Urubu, AM (KARMANN, 1986; KARMANN e SANCHEZ, 1986) e a terceira atualmente identificada é a da Chapada dos Guimarães, MT (KARMANN e SANCHEZ, em preparação).

PINHEIRO (1988) propõe a extensão do conceito aos agrupamentos de cavernas recentemente descobertos em formações intempéricas na Amazônia. A primeira província espeleológica definida neste tipo de formação é a Serra dos Carajás, PA (PINHEIRO e MAURITY, 1988).

Todavia, não é de meu conhecimento a existência de trabalhos que tenham tratado das duas ordens de grandeza inferiores, ou seja, distrito e sistema, à exceção do trabalho de PEREZ e GROSSI (1986) sobre o distrito espeleológico quartizítico da Ibitipoca.

Província e distrito espeleológico

A concepção metodológica do modelo província-distrito-sistema foi posteriormente explicitada por KARMANN e SANCHEZ (1986) e a definição de província ampliada para incluir cavidades não carbonáticas: "Duas condições são necessárias para definir uma província espeleológica: continuidade geológica (a mesma unidade litoestratigráfica, mesmo se ela não for geograficamente contínua) e a presença de um agrupamento de cavernas. O número absoluto de cavernas não é importante, nem a superfície da unidade litoestratigráfica, mas a relação entre o número de cavernas e a área. Todavia, o critério é conceitual, e não numérico. Dentro de uma província espeleológica, pode-se definir distritos espeleológicos em setores de maior incidência local ou regional de cavernas, cuja existência demonstra a descontinuidade dos processos cársticos ao longo da província geológica, aqui designada província espeleológica para fins de estudos cársticos. Analogamente, no caso de rochas não carstificáveis (4), o distrito espeleológico demonstra a concentração de fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos que combinam-se local ou regionalmente ocasionando espeleogênese.

"O conceito de distrito espeleológico, num nível inferior de análise, é relacionado a fatores de ordem local ou regional, enquanto que o conceito de província espeleológica é relacionado a feições geológicas de grande escala. Na definição e delimitação dos diferentes distritos dentro de uma província, os seguintes fatores devem ser levados em conta:

- continuidade da unidade litoestratigráfica e suas variações estruturais e faciológicas;
- a concentração de cavernas e feições cársticas em alguns setores da província;
- a compartimentação topográfica;
- a tipologia das cavernas e do carste;
- variações topo e microclimáticas;
- variações da cobertura vegetal."

"Aumentando ainda mais a escala de análise, dentro de cada distrito espeleológico podem ser reconhecidos sistemas de cavernas, com base no conhecimento integrado sobre as áreas de entrada de água, seus fluxos subterrâneos e as modalidades de saída com relação ao conjunto cárstico. Este conceito trabalha com fatores de ordem local como os fluxos hídricos subterrâneos e as estruturas geológicas locais (padrões de acamamento, dobramento, fraturamento e falhamento e variações faciológicas)."

Importa salientar que o fator predominante para a definição de uma província é geológico. Para a definição de um distrito o mais importante é considerar o modo de interação entre fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos, e para a definição de sistemas entra em jogo fundamentalmente o fator hidrológico. É claro que nas três ordens de grandeza concorrem todos os tipos de fatores mencionados, mas para maior clareza de entendimento parece-me útil fazer tal distinção.

Sistema espeleológico

Para o desenvolvimento de um sistema de cavernas é necessário uma continuidade não mais unicamente litoestratigráfica, mas espacial da unidade geológica. Restrinjamo-nos às rochas carbonáticas, por ser o caso clássico: se as condições para a carstificação estiverem reunidas (THORNBURY, 1969), será todo o maciço calcário que será submetido à ação da água, até uma determinada profundidade, em função do nível de base e de suas variações. No interior deste maciço, formar-se-ão uma série de condutos que drenarão a água para uma ou mais saídas. Alguns destes condutos terão dimensão suficiente para permitir a passagem de espeleólogos e terão abertura para o exterior, o que permitirá o acesso às cavernas assim constituídas.

Como se sabe, nem todos os condutos penetráveis pelo homem são acessíveis, e nem todos os condutos são penetráveis (por serem de exígua dimensão). Com muita frequência, porém, várias cavernas são exploradas num mesmo maciço e às vezes é possível realizar "junções" subterrâneas, ou seja, aceder de uma caverna a outra por passagens emersas ou submersas. Mesmo que seja necessário desobstruir fisicamente uma passagem (às vezes com a ajuda de explosivos ou de meios mecânicos), basta que a passagem em si seja natural para que doravante se fale de uma caverna única (5). É por junções sucessivas de cavernas conhecidas anteriormente que "crescem" em desnível e em desenvolvimento as maiores cavernas do mundo.

4 Originalmente, "não carbonáticas". Hoje em dia, porém a tendência predominante é de se considerar também como processo cárstico a espeleogênese em rochas detríticas (clastocarste: arenitos, quartzitos, conglomerados, metaconglomerados) por analogia à espeleogênese em rochas solúveis (rochas carbonáticas, gesso, formações salinas) e em detrimento da denominação pseudocarste. Aqui houve a preocupação de deixar suficientemente amplo o conceito de província espeleológica, para englobar cavernas que ocorram em outras litologias (rochas vulcânicas, graníticas, etc.) e cuja origem não é devida a um processo de tipo cárstico.

5 Mesmo se existe uma questão ética não resolvida (a supor que uma questão ética possa ter uma "solução", ainda que temporária) a respeito da desobstrução, entendida normalmente como remoção de sedimentos, mas às vezes como remoção de concreções e até alargamento de passagens estreitas em rocha mãe.

Este "produto" da atividade exploratória recebe vários nomes, todos designando a mesma coisa. Os francofônicos utilizam o termo réseau (rede), système ou complexe, os anglofônicos, system, os hispanofônicos sistema e os germanofônicos, System. Já os italianos preferem complesso. No Brasil usa-se também o termo sistema, mas persiste o emprego de conjunto e complexo.

Quanto a este último, dizia Ab'Saber que chamamos de complexo tudo aquilo cujo funcionamento não entendemos. Creio que temos um entendimento suficiente do carste para poder dispensar o termo complexo neste sentido. Quando a conjunto, a palavra é usada aqui no sentido de grupo. Ora, um sistema de cavernas, nos termos em que foi definido acima, é muito mais que um agrupamento: é uma unidade genética e funcional cujas características vão ser discutidas abaixo. Mesmo um sistema constituído por uma única caverna é muito mais que ela, pois engloba todos os condutos e microespaços impenetráveis, e não apenas as partes visitáveis pelo homem.

A meu ver, complexo ou conjunto (ou rede) são termos que (a) não trazem nenhuma precisão adicional (como prova seu uso assistemático em espeleologia, tanto no Brasil como no exterior) e (b) dificultam o entendimento dos fenômenos cársticos (pois não são parte de uma concepção integrada da dinâmica espacial destes fenômenos).

Proponho, pois, o uso do termo sistema espeleológico (ou cárstico, ver adiante) como unidade lógica de referência para estudos espeleológicos. Unidade porque, como vimos, é o resultado mais conspícuo dos processos cársticos. Lógica porque, como veremos, a idéia de sistema fornece um instrumento conceitual para a análise destes processos cársticos. E de referência porque sua escala é a da confluência de dois raciocínios de direção oposta: uma descendente (da ordem de grandeza da província passa-se à de distrito e à de sistema) e outra ascendente (a partir da caverna, onde começaram historicamente os estudos cársticos, passou-se a uma categoria englobante, o sistema) e porque o objeto privilegiado dos estudos espeleológicos deve ser o sistema - nem a província nem a caverna.

É bem verdade que a palavra sistema tem inúmeras conotações e é empregada em muitíssimas áreas tanto da ciência quanto da vida cotidiana e, com frequência, de maneira nada rigorosa. Todavia, a teoria geral dos sistemas tal como conceituada por Bertalanffy encontrou inúmeras aplicações em quase todos os campos da pesquisa científica, e seria importante verificar se o conceito de sistema espeleológico é consistente com esta teoria. Em caso afirmativo, todo um conjunto de métodos proveniente da abordagem sistêmica pode ser empregado proveitosamente.

Por exemplo, se "a colonização de várias cavernas é feita por dispersão subterrânea, através do sistema de fendas e microespaços interconectados que caracterizam as rochas solúveis, como os calcários" e "rochas insolúveis frequentemente constituem barreiras à dispersão desses organismos, sobretudo no caso das formas terrestres, normalmente limitadas a uma ou várias cavernas da mesma lente contínua de rochas carbonáticas" (TRAJANO, 1986) então a estratégia de preservação de uma população hipógea, bem como o estudo da ecologia subterrânea, só podem ser feitos tendo como referência um sistema espeleológico, pois o leitor já terá compreendido que "uma ou várias cavernas da mesma lente contínua de rochas carbonáticas" junto com "fendas e microespaços interconectados" constituem um sistema espeleológico. E mais, este sistema constituirá o biótopo do ecossistema hipógeo, pois há que se lembrar que a vida subterrânea não se reduz à vida cavernícola, mas ocorre igualmente nos microespaços do maciço rochoso. Para HOWARTH (1986), os troglóbios habitam "as mesocavernas, um sistema anastomosado de vazios variando em tamanho de cerca de 0,1 cm a 20 cm de largura, e as macrocavernas, que incluem as passagens estudadas na pesquisa bioespeleológica tradicional". (As microcavernas teriam dimensão menor que 0,1 cm e seriam características dos solos, sendo pequenas demais para admitir a presença da maior parte dos animais cavernícolas (HOWARTH, 1983).) Anteriormente, este mesmo autor tinha elegantemente descrito cavernas como "janelas pelas quais podemos observar a fauna nos vazios do maciço rochoso" (HOWARTH, 1980).

ROUCH (1986) estima que "convém repensar o povoamento das águas subterrâneas continentais" devido, por um lado, aos progressos técnicos na prospecção bioespeleológica, e, por outro, ao fato de que "agora está bem estabelecido que o domínio subterrâneo aquático não se limita às grutas e lençóis freáticos

parafluviais. Ora, no carste, somente a zona de infiltração foi objeto de investigações repetidas. Por outro lado, não sabemos quase nada sobre a fauna dos carstes afogados, a não ser quando, nos lugares onde foram prospectados, eles mostraram ter um rico povoamento."

Sistema espeleológico e sistema cárstico

Partindo de uma análise do funcionamento dos aquíferos cársticos, MANGIN (1974a,b, 1975) propôs o termo e o conceito de sistema cárstico. Como é sabido, o comportamento do aquífero cárstico difere fundamentalmente do comportamento de um aquífero em meio poroso. A permeabilidade do carste sendo originária do fraturamento do maciço rochoso, o modelo clássico do aquífero cárstico é o do meio fissurado, no qual os vazios são representados por fissuras originárias de um campo de tensões e repartidas segundo uma mesma distribuição por todo o maciço. Isto ocasiona uma equiprobabilidade das propriedades do meio que não representa com exatidão o aquífero cárstico, caracterizado por uma hierarquização dos canais de drenagem de montante a jusante e uma diferença fundamental entre a zona de infiltração (vadosa), onde o escoamento se faz por drenos em geral verticais, "pouco numerosos e dispostos de modo regular, em ligação com as descontinuidades pré-existentes: falhas e diaclases" e a zona inundada (freática), onde "a hierarquização dos vazios é muito nítida" e podem ser distinguidas "as zonas de drenos, muito pouco capacitivas, mas muito transmissivas e as zonas drenadas, chamadas sistemas anexos à drenagem que, ao contrário, são muito capacitivas, mas pouco transmissivas. Foi igualmente posto em evidência que, se os sistemas anexos possuem uma baixa permeabilidade, eles não são obrigatoriamente representados por zonas de fissuras; eles oferecem frequentemente grandes cavidades, pois a carstificação ali é muito ativa." (6) (MANGIN, 1984a.) Os sistemas anexos, todavia, requerem uma melhor definição, qualitativa e quantitativamente (BURGER, 1980).

O desenvolvimento deste modelo permitiu aos pesquisadores do Laboratório Subterrâneo do CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), França (a) identificar tipos diferentes de carste segundo seu comportamento hidrogeológico e (b) desenvolver estudos interdisciplinares que incluem as respostas química, isotópica, térmica e biológica do carste. (BAKALOWICZ, 1975, 1977; MANGIN, 1984b, 1985; MOESCHLER et al., 1982; ROUCH, 1980) Esta resposta biológica é extremamente interessante na medida em que "o sistema cárstico, entidade física, constitui igualmente uma unidade sob os planos faunístico e ecológico. Ele deve ser considerado como um ecossistema." (ROUCH, 1980)

Em particular, ROUCH (1977) foi levado a "substituir a noção de gruta pela de aquífero cárstico" pois suas pesquisas mostraram que "o biótopo das formas subterrâneas engloba a totalidade do aquífero cárstico e que as cavidades acessíveis ao homem somente fornecem uma imagem parcial e frequentemente pontual do povoamento subterrâneo" e que, como para os geomorfólogos, também em estudos ecológicos, "as pesquisas sobre o meio subterrâneo cárstico não devem ser separadas dos estudos efetuados em superfície. É evidente que o conhecimento dos meios epígeos terrestres e aquáticos de uma bacia vertente cárstica será necessário se um dia se quiser calcular o balanço energético de tais sistemas."

O sistema cárstico é definido como "o implúvio e o aquífero ao nível do qual os escoamentos do tipo cárstico constituem uma unidade de drenagem." (7) (MANGIN, 1984a, 1985) Ou seja, de certa forma o sistema cárstico é o equivalente de uma bacia vertente subaérea. Isto é muito importante e decorre da

6 Observação que é muito importante para o espeleoexplorador que sabe reconhecer as diferenças entre galerias vadosas e galerias freáticas.

7 O "impluvium" era a bacia escavada no átrio das casas romanas destinada a recolher as águas de chuva. Em hidrologia o termo é definido como "uma bacia vertente de tamanho extremamente reduzido, cuja superfície é eventualmente impermeabilizada por meios artificiais a fim de coletar o máximo de água de chuva." (M.F. ROCHE, 1986, Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Masson, Paris) No contexto da definição de MANGIN entenda-se implúvio como a bacia vertente captadora da água que entra no aquífero cárstico.

observação de que os vazios num maciço calcário carstificado são hierarquizados, como os rios em superfície, e, portanto, fundamentalmente diferentes de aquíferos porosos ou fissurados, que supõem uma homogeneidade não verificada na realidade. O sistema cárstico "possui uma estrutura de vazios criados pelos próprios escoamentos e hierarquizados à maneira de redes hidrológicas de superfície; esta estrutura é tal que a heterogeneidade existe em todas as escalas de tempo ou de espaço." (BAKALOWICZ e MANGIN, 1980) O sistema cárstico é, pois, um objeto fractal.

Além dos subsistemas "infiltração" (a zona vadosa) e "carste inundado" (zona freática), sempre presentes, pode ocorrer um terceiro subsistema, denominado "implúvio não cárstico" e composto pelos terrenos não cársticos eventualmente situados a montante. Neste modelo há que se considerar a totalidade dos fluxos hídricos que entram e saem do sistema, e daí a necessidade de incorporar os terrenos não cársticos como parte do sistema cárstico, embora estes não participem do aquífero cárstico. (Há "não concordância entre a noção de sistema e aquela de aquífero.") "Estes terrenos não cársticos, quando presentes, desempenham um papel muito importante no funcionamento do conjunto" por "concentrar o escoamento de superfície, proporcionando entradas de água consideráveis em pontos privilegiados do aquífero" (MANGIN, 1985), ao contrário das entradas pluviais, distribuídas quase homogeneamente sobre o conjunto.

Devido a esta razão JAKUCS (1977) distingue carstes autogênicos e alogênicos, termos descritivos da relação orográfica entre o maciço cárstico e seu entorno não cárstico. No primeiro tipo o maciço encontra-se num nível topograficamente superior ao do entorno não cárstico, o que implica que não há água superficial fluindo para o carste. Já um carste alogênico situa-se a cotas topográficas inferiores às dos terrenos não cársticos dos arredores, de forma que há cursos d'água lineares drenando o entorno em direção ao carste.

Sistemas cársticos deste segundo tipo terão, portanto, um subsistema não cárstico, mas os sistemas cársticos do primeiro tipo eventualmente também poderão tê-lo, desde que recebam água subterrânea proveniente do entorno.

Assim como para Mangin, também para JAKUCS (1977) as contribuições hídricas provenientes das superfícies não cársticas "desempenham um papel dominante de controle qualitativo do processo cárstico" e podem originar cavidades bastante diferentes das que ocorrem em carstes autogênicos.

Como geomorfólogos no passado "não reconheceram nem deram a devida importância às diferenças fundamentais e mesmo tendências opostas no desenvolvimento dos carstes autogênicos e alogênicos, eles conseqüentemente não foram capazes de interpretar corretamente diversos fenômenos." Diferenças espeleomorfológicas, espeleométricas, espeleoclimáticas, ecológicas e no tipo e quantidade de espeleotemas podem ser observadas em cavernas situadas nestes dois tipos básicos de carste.

O que é extremamente importante salientar para efeito desta discussão é que (a) tanto a abordagem hidrogeológica quanto a geomorfológica vistas rapidamente acima são concordantes entre si, e (b) ambas provêm de uma análise global onde o carste - entendido como um sistema - é estudado com relação a seu entorno. Foi esta visão não clássica - sistêmica e não cartesiana - que permitiu esta melhor compreensão do funcionamento do carste. Esta nova maneira de pensar é, portanto, um novo paradigma.

Foi um outro paradigma, que via a parte antes do todo, que presidiu a definição de complexos, conjuntos e redes. Também este último termo, que exprime uma idéia de entrelaçamento, de interconexão, tem seu emprego originado no fato de que o avanço da exploração espeleológica levou à interconexão de cavernas previamente conhecidas no interior de um mesmo maciço calcário. O vocábulo expressa bem um conceito construído, tecido, de baixo para cima, pela colagem de apêndices sucessivos a um corpo original e evoca muito mais a idéia de um esqueleto constituído no interior de um mesmo maciço calcário por uma sucessão de galerias penetráveis pelo homem do que a totalidade de espaços vazios (e interconectados) existente neste mesmo maciço.

Também o termo conjunto, como empregado na expressão "conjunto Sao Mateus-Imbira" conota uma representação contruída a partir de constituintes menores - no caso as galerias de dois rios confluentes - para formar um todo maior - a caverna.

Por outro lado, observa-se igualmente o emprego do termo sistema como por exemplo no "sistema Santana-Pérolas". É provável que tal uso se explique pelo caráter linear deste sistema, onde inequivocamente as águas que se perdem na caverna das Pérolas ressurgem na caverna Santana (o que foi provado por coloração), o mesmo ocorrendo com as águas drenadas pelas cavernas situadas entre estas duas.

Já nos chamados complexos, como o "complexo das Areias" ou o "complexo Alambari" a determinação das direções dos fluxos hídricos foi durante muito tempo considerada duvidosa, e ainda hoje não está muito clara, o que confirma a interpretação de Ab'Saber de que chamamos complexo aquilo que não compreendemos bem. (8)

Espero ter mostrado o por quê de se estudar sistemas. Levando esta lógica ao extremo, o objeto da pesquisa espeleológica não seria a caverna, mas o sistema. (9)

É claro que vamos continuar estudando (e explorando) cavernas, e também setores de cavernas: há milhares de pesquisas pontuais que podem ser feitas e são indispensáveis para a compreensão do todo. Mas, por outro lado, com este novo paradigma, um campo muito vasto se abre à pesquisa tanto uni quanto interdisciplinar.

Construir um modelo de carste consistente com a teoria geral dos sistemas permite a utilização de vários novos instrumentos para elucidar seu funcionamento, principalmente análises de correlação entre as entradas e as saídas do sistema.

Isto foi feito pela equipe do Laboratório Subterrâneo do CNRS, com a análise de dados provenientes de carstes experimentais nos Pirineus. Fundamentalmente os métodos empregados consistem no tratamento de séries cronológicas de dados de fluxos de entrada e saída de água, tendo as análises correlatória e espectral se revelado as mais ricas em interpretações possíveis. Tais métodos revelam-se "particularmente bem adaptados aos carstes, para os quais os únicos dados possíveis e fiáveis são frequentemente restritos às entradas e saídas" (MANGIN, 1981a), embora eles não sejam suficientes para uma simulação precisa da realidade e devam ser complementados por outros métodos. (MANGIN, 1981b)

Uma tipologia dos sistemas cársticos pôde ser determinada (MANGIN, 1984b). "O sistema cárstico no sentido da análise sistêmica é identificado a um filtro que deixa passar mais ou menos informação." (MANGIN, 1984a.) Além disso, uma parte da informação pode ser retida temporariamente, causando "efeitos-memória que modulam, a curto, médio e longo prazo, o sinal de entrada correspondente à chuva. A modulação deste sinal é característica de cada sistema; ela traduz a importância das reservas e a maneira pela qual estas se constituem e se esvaziam. Ela fornece em consequência um índice do estado de carstificação do sistema." (MANGIN, 1984b.)

8 Um dos desdobramentos da teoria geral dos sistemas de Bertalanffy e da teoria da informação de Shannon foi a definição de sistemas auto-organizados e de "sistemas hipercomplexos" (Morin). A complexidade é aqui medida em termos de quantidade de informação, o que é concordante com a ideia de Ab'Saber. Esta questão, todavia, está além do escopo deste artigo.

9 Isto pode ser considerado como uma resposta à preocupação de CURL (1986) sobre "o presente antropomorfismo dos estudos de cavernas, nos quais elas frequentemente são definidas apenas como 'penetráveis por humanos', limitando assim - implicitamente - o seu estudo." Este autor crê que a aplicação da geometria fractal à espeleologia contribuirá para a eliminação deste antropomorfismo, o que me parece correto. Mas estudar sistemas também, pois o objeto de estudo deixa de ser o espaço penetrável pelo homem e passa a ser todo o espaço carstificado.

Neste ponto pode-se fazer uma distinção entre sistema cárstico e sistema espeleológico. Enquanto o sistema cárstico inclui um subsistema não cárstico, o sistema espeleológico só compreenderia os subsistemas infiltração e carste inundado. Mas falar desta diferença só tem sentido quando se quer distinguir entre uma atividade científica, que deveria interessar-se pelo sistema cárstico, e uma atividade esportiva, que normalmente só se interessaria pelo sistema espeleológico. (10) Além do mais, a atividade espeleoesportiva tradicional só se desenvolve no subsistema infiltração; as explorações do carste inundado são relativamente recentes e ainda restritas.

Preservação

A compreensão de um fenômeno permite o desenvolvimento de técnicas para seu eventual aproveitamento humano. Uma maior entendimento dos processos cársticos deve dar lugar à elaboração de estratégias de preservação e de conservação, entendida aquela como a não intervenção antrópica no sistema e esta como o seu manejo de forma a evitar impactos irreversíveis, acima da capacidade de assimilação do meio receptor.

Exemplo clássico em carste é o aproveitamento dos recursos hídricos, frequentemente a única fonte de suprimento de água em milhares de quilômetros quadrados, e o problema da poluição dos aquíferos.(11)

A ocupação e o aproveitamento econômico de terrenos cársticos na Europa, Ásia e em parte da América Pré-Colombiana foi feita com base em conhecimentos empíricos acumulados ao longo de milhares de anos, embora sofrendo aceleração intensa no último meio século. No Brasil, com raras exceções, os terrenos cársticos são escassamente povoados e a atividade econômica neles desenvolvida é via de regra de pouca importância. Atualmente, contudo, esta situação tende a mudar rapidamente, com um número crescente de projetos sendo desenvolvidos em regiões como o vale do São Francisco e o centro-norte de Goiás.

Típicos do atual estilo de desenvolvimento, tais projetos geralmente são intensivos em capital, de grande escala e grandes consumidores de recursos, gerando importantes impactos ambientais. Evidentemente um bom conhecimento global do funcionamento dos sistemas cársticos é fundamental e indispensável para a sua gestão.

Por outro lado, no traçado de uma unidade de preservação ambiental em zona cárstica, a solução mais evidente é a de tentar proteger a maior área possível, englobando todo o sistema cárstico, ou seja, incluindo o subsistema não cárstico a montante. (WILSON, 1977.) É o que foi proposto para o carste de São Domingos, Goiás (KARMANN et al., 1984).

Na maior parte dos casos, porém, e por diversas razões, tal situação ideal não pode ser atingida, devendo ser proposta uma solução intermediária. É principalmente nestes casos que uma compreensão aprofundada do funcionamento do sistema cárstico é mais necessária: uma vez que não se possa preservar tudo será preciso definir quais são as áreas prioritárias para preservação dentro de um mesmo sistema, o que, para ter razoáveis chances de sucesso, depende da construção de um bom modelo desse sistema.

10 Embora ocasionalmente ele possa necessitar de informações sobre o funcionamento do subsistema não cárstico, como por exemplo a vazão de um rio e o risco de ocorrência de inundações.

11 Diversos autores abordaram o problema dos impactos ambientais em zonas cársticas. Vide, por exemplo, LEGRAND E STRINGFIELD (1973), LEGRAND (1977), as atas do Colóquio Internacional de Carstologia Aplicada de Liège (1984) publicadas nos Annales de la Société Géologique de Belgique 108: 1-304, 1985; e também INTERNATIONAL GEOGRAPHICAL UNION, STUDY GROUP ON MAN'S IMPACT IN KARST (1987) - Karst and Man. Proceedings of the International Symposium on Human Influence in Karst, 11-14th September 1987, Postojna. Dep. of Geography, Philosophical Faculty, University G. Kardelj of Ljubljana.

Mas esta é uma atividade que demanda muito tempo e recursos, o que nem sempre é disponível. Na prática, então, os espeleólogos se deparam frequentemente com o problema de preservar cavernas sem dispor dos meios de estudá-las extensivamente. É quando se faz mais necessário dispor de um modelo conceitual sólido, não para aplicá-lo diretamente à solução de problemas práticos, mas para usá-lo como paradigma nesta solução.

Espera-se que a abordagem sistêmica, por permitir o estudo interdisciplinar e integrado do carste, possa contribuir para sua conservação e manejo. Tal aplicação, porém, encontra vários problemas, mas não é meu objetivo tentar tratá-los neste artigo. Eis um vasto campo aberto à reflexão.

Agradecimentos

Agradeço a I. Karmann, J.C. Setubal e E. Trajano pela leitura crítica do manuscrito.

Referências bibliográficas

- AB'SABER, A.N. 1979. Geomorfologia e espeleologia. Espeleo-Tema, v. 12, p. 25-32.
- BAKALOWICZ, M. 1975. Géochimie des eaux karstiques et karstification. Annls Spéléol., v. 30, n. 4, p. 581-9.
- BAKALOWICZ, M. 1977. Etude du degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle. Comptes-Rendus Séanc. Acad. Scienc. Paris, Sér. D, v. 284, p. 2463-7.
- BAKALOWICZ, M.; MANGIN A. 1980. L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. Mémoires Hors Série Soc. Géologique France, v. 11, p. 71-9.
- BURGER, A. 1980. Rapport général sur le thème 3: milieux karstiques. Mémoires hors série Soc. Géologique France, v. 11, p. 29-36.
- CAILLEUX, A.; TRICART J. 1956. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. Annls Géographie, v. 65, p. 162-86.
- CURL, R. 1986. Fractal Dimension and Geometries of Caves. Mathematical Geology, v.18, p. 765-83.
- HOWARTH, F.G. 1980. Non-Relictual Terrestrial Troglobites in the Tropical Hawaiian Caves. INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY 8., Bowling Green, 1980. Proceedings, v.2, p. 539-41. Bowling Green.
- HOWARTH, F.G. 1983. Ecology of Cave Arthropods. Annual Review Entomology, v. 28, p. 365-89.
- HOWARTH, F.G. 1986. The Tropical Cave Environment and the Evolution of the Troglobites. CONGRESO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA 9, Barcelona, 1986. Comunicaciones, v.2, p. 153-5. Barcelona, Comissió Organitzadora.
- JACUKS, L. 1977. Morphogenetics of Karst Regions. Adam Hilger, Bristol. 284p.
- KARMANN, I. 1986. Caracterização geral e aspectos genéticos da gruta arenítica "Refúgio do Maroaga", AM-02. Espeleo-Tema, v. 16, p. 9-18.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. 1979. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas no Brasil. Espeleo-Tema, v. 13, p. 105-67.

- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. 1986. Speleological Provinces in Brazil. CONGRESO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9, Barcelona, 1986. Comunicaciones, v. 1, p. 151-3. Barcelona, Comissió Organitzadora.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E.; MILKO P. 1984. Proposta preliminar de uma unidade de conservação para as cavernas de São Domingos, Goiás. Espeleo-Tema, v. 14, p. 36-42.
- LEGRAND, H.E. 1977 - Hydrological and Ecological Problems of Karst Regions. Science, v. 179, p. 859-64.
- LEGRAND, H.E.; STRINGFIELD V.T. 1973. Karst Hydrology - a Review. J. Hydrology, v. 20, p. 97-120.
- MANGIN, A. 1974a. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Annls Spéléol., v.29, n. 3, p. 283-332.
- MANGIN, A. 1974b. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Annls Spéléol., v.29, n. 4, p. 495-601.
- MANGIN, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Annls Spéléol., v. 30, n. 4, p. 21-124.
- MANGIN, A. 1981a. Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Comptes-Rendus Séanc. Acad. Scienc. Paris, Sér. II, v. 293, p. 401-4.
- MANGIN, A. 1981b. Apports des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. Comptes-Rendus Séanc. Acad. Scienc. Paris, Sér. II, v. 293, p. 1011-4.
- MANGIN, A. 1984a. Ecoulement en milieu karstique. Annls des Mines, mai-juin, p. 1-8.
- MANGIN, A. 1984b. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. J. Hydrology, v. 67, p. 25-43.
- MANGIN, A. 1985. Progrès récents dans l'étude hydrogéologique des karsts. Stygologia, v. 1, n. 3, p. 239-57.
- MARTINS, S.B.M.P. 1985. Levantamento dos recursos naturais do distrito espeleológico de Altinópolis, SP. Relatório FAPESP, proc. n. 83/2552-3, Rio Claro, 121 pp.
- MOESCHLER, P.; MULLER, I.; SCHTTERER, U. 1982. Les organismes vivants, indicateurs naturels dans l'hydrodynamique du karst, confrontés aux données isotopiques, chimiques et bactériologiques, lors d'une crue de la source de l'Areuse (Jura Neuchâtelois, Suisse). Beitraege zur Geologie der Schweiz - Hydrogeologie. v. 28, p. 213-24.
- PEREZ, R.C.; GROSSI, W.R. 1986. The Quartzitic Speleological District of the Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brazil. CONGRESO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA 9, Barcelona, 1986. Comunicaciones, v. 2, p. 12-4. Barcelona, Comissió Organitzadora.
- PINHEIRO, R.V.L. 1988. Nova proposta para classificação de províncias espeleológicas. CONGRESSO DE ESPELEOLOGIA DA AMERICA LATINA E CARIBE, 1, Belo Horizonte, 1988. Anais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Espeleologia.
- PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. 1988. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA), Brasil. CONGRESSO DE ESPELEOLOGIA DA AMERICA LATINA E CARIBE, 1, Belo Horizonte, 1988. Anais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Espeleologia.
- ROUCH, R. 1977. Considérations sur l'écosystème karstique. Comptes-Rendus Séanc. Acad. Scienc. Paris, Sér. D, v. 284, p. 1101-3.

- ROUCH, R. 1980. Les Harpacticides, indicateurs naturels de l'aquifère karstique. Memoires Hors Série Soc. Géologique France, v. 11, n. 104-16.
- ROUCH, R. 1986. Copepoda: les Harpacticoides souterrains des eaux douces continentales. In: L. BOTOSANEANU (Ed.), Stygofauna Mundi., Leiden, E.J. Brill. 740p.
- THORNBURY, W.D. 1969. Principles of Geomorphology. New York. Wiley International, 2nd edition, xii+594p.
- TRAJANO, E. 1986. Vulnerabilidade dos troglóbios a perturbações ambientais. Espeleo-Tema, v. 15, p. 19-24.
- TRICART, J. 1965. Principes et méthodes de la géomorphologie. Paris. Masson, 496p.
- WILSON, J. 1977. Caves: Changing Ecosystems? Stud. Speleol., v. 3, n. 1, p. 35-8.