



ANAIS do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Brasília-DF, 20-23 de Abril de 2022



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE) disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br.

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

MORGADO, M. G. A.. Flexibilização da legislação espeleológica brasileira e potenciais riscos associados aos aquíferos cársticos In: MOMOLI, R. S.; STUMP, C. F.; VIEIRA, J. D. G.; ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 36, 2022. Brasília. *Anais...* Campinas: SBE, 2022. p.443-450. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais36cbe/36cbe_443-450.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

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

FLEXIBILIZAÇÃO DA LEGISLAÇÃO ESPELEOLÓGICA BRASILEIRA E POTENCIAIS RISCOS ASSOCIADOS AOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS

FLEXIBILIZATION OF BRAZILIAN SPELEOLOGICAL LEGISLATION AND POTENTIAL RISKS ASSOCIATED TO KARST AQUIFERS

Moema Guimarães de Azeredo MORGADO ⁽¹⁾

(1) Geóloga, Mestre em Geologia e Doutora em Política e Gestão da Sustentabilidade pela Universidade de Brasília. Consultora Assistente de Apoio Técnico à Coordenação Nacional de Projetos no Brasil (GEF Amazonas/ ANA / OTCA / PNUMA).

Contato: moema.unb@gmail.com.

Resumo

No atual contexto do licenciamento ambiental, a legislação infraconstitucional específica sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional traz em sua atual flexibilização potenciais riscos associados aos aquíferos cársticos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar criticamente a promulgação do Decreto Federal nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022, que ocorreu sem a participação da comunidade científica e espeleológica no processo de tomada de decisão política. Por meio de dados de análises químicas realizadas em águas provenientes de aquíferos cársticos no DF foi possível correlacionar a presença de efluentes contaminantes nas águas subterrâneas, devido a presença de atividades antrópicas na área estudada. Das 15 amostras de água subterrânea analisadas, 10 delas (67%) continham concentrações de elementos químicos provenientes de atividades antrópicas. A acidificação destas águas pela presença dos contaminantes eleva ainda mais seu poder corrosivo, aumentando a dissolução dos minerais carbonáticos formadores dos aquíferos cársticos, podendo ocasionar ainda efeitos sinérgicos e deletérios ao patrimônio natural e ao ecossistema cárstico.

Palavras-Chave: Licenciamento ambiental; contaminação; água subterrânea; sistema cárstico.

Abstract

In the current context of environmental licensing, the specific infraconstitutional legislation about protection of natural underground cavities existing in Brazil brings, in its current flexibility, potential risks associated to karst aquifers. Thus, the objective of this work was to critically evaluate the enactment of Federal Decree nº 10.935, of January 12, 2022, which took place without the scientific and speleological community participation in the political decision-making process. Through chemical analysis data carried out in water from karst aquifers in DF, it was possible to correlate the presence of polluting effluents in groundwater, due to the presence of anthropic activities in the studied area. Of the 15 groundwater samples analyzed, 10 of them (67%) contained concentrations of chemical elements from human activities. The acidification of these waters due to the presence of contaminants increases their corrosive power even more, increasing the dissolution of the carbonate minerals that form the karst aquifers, and may also have synergistic and deleterious effects on the natural heritage and the karst ecosystem.

Keywords: Environmental licensing; contamination; groundwater; karst system.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente cárstico, singular na Terra, é caracterizado por ter a água subterrânea como agente essencial na sua formação, o que confere a este ecossistema características únicas e peculiares. Compreendendo cavernas, cânions, paredões rochosos e relevos ruiformes produzidos pela ação geológica da água subterrânea sobre rochas mais solúveis, esses ambientes ainda constituem sistemas pouco conhecidos sob o enfoque da complexidade

de suas dinâmicas físico-químicas e biológicas. No Brasil, os aquíferos cársticos são pouco estudados, destacando-se os trabalhos de KARMMAN (1994) e VALLE (2004).

Uma das peculiaridades dos sistemas cársticos é o fato de, mesmo após a espeleogênese, a água continuar a exercer sua dinâmica solubilizadora sobre as rochas carbonáticas, além de carrear e depositar sedimentos clásticos e químicos, ocasionando muitas vezes o aporte de substâncias

potencialmente contaminantes, o que torna o ambiente cárstico altamente vulnerável.

As condições geológicas e climáticas do Brasil permitiram a formação de sistemas aquíferos, alguns deles de extensão regional, com altos volumes de água e excelentes vazões. Os aquíferos cársticos e fissuro cársticos são formados pela dissolução cárstica, que ocorre pela ação da água sobre as rochas carbonáticas após a diagênese e litificação das mesmas, constituindo um tipo especial de porosidade secundária denominada porosidade cárstica (KARMMAN, 2004; CAMPOS, 2011). De maneira geral, as águas subterrâneas encontram-se mais protegidas da entrada de contaminantes por serem total ou parcialmente confinadas, atuando a camada de solo e rocha sobrejacente como meio filtrante (FOSTER & HIRATA, 1998). Entretanto, os aquíferos cársticos e fissuro cársticos possuem naturalmente elevada solubilidade em decorrência dos minerais solúveis que os constituem, permitindo a entrada de contaminantes através das fissuras que vão se desenvolvendo nessas rochas (FRISTZSONS *et al.*, 2001). A conexão direta entre a superfície e o aquífero subjacente torna os aquíferos cársticos extremamente vulneráveis à contaminação, que pode chegar rapidamente aos poços e nascentes (COVINGTON *et al.*, 2009). Dessa maneira, a alta vulnerabilidade dos aquíferos cársticos/fissuro cársticos é atribuída à elevada velocidade de circulação da água subterrânea nesse ecossistema (FRANTZ, 2005).

Diante da vulnerabilidade associada ao ambiente cárstico e aos potenciais riscos ambientais envolvidos, é dever do Estado formular políticas de gestão ambiental sincronizadas com a noção de sustentabilidade, na qual as ações humanas passam a ser analisadas quanto à incidência dos seus efeitos tanto no presente quanto no futuro. Com o objetivo final de garantir à espécie humana o direito fundamental de viver no meio ambiente ecologicamente equilibrado, a Constituição Federal de 1988 determina que cabe ao Poder Público a responsabilidade de proteger o meio ambiente, interditando as práticas que coloquem em risco sua função ecológica ou provoquem a extinção de espécies (Art. 225, caput e seu § Ia, VII). Assim, para que as ações humanas atuais possam garantir vida digna e saudável para as gerações futuras, é esperado que o Estado brasileiro direcione as políticas públicas e as normas regimentais segundo um prognóstico dos efeitos ambientais no tempo cronológico bem como das consequências de sua duração (MACHADO, 2018).

A condição essencial para a manutenção da vida na Terra é a preservação dos recursos hídricos,

uma vez que todos os seres vivos são dependentes de água para sobrevivência. Nesse sentido, um dos aspectos mais importantes para subsidiar o planejamento do uso do solo e a gestão sustentável de empreendimentos potencialmente degradadores aos recursos hídricos subterrâneos, é o estabelecimento de critérios e mecanismos protetivos fundamentados em dados e estudos técnicos e científicos, reconhecendo sua vulnerabilidade para aplicação dos princípios constitucionais de prevenção e precaução, promovendo a busca da sustentabilidade aliada ao desenvolvimento econômico (MORGADO, 2019).

Diante do exposto, o presente trabalho traz uma avaliação e reflexão crítica sobre a atualização do quadro normativo que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, com a recente publicação do dispositivo legal que revogou o Decreto Federal nº 99.556/1990. Discute-se a necessidade de um esforço por parte do Estado brasileiro na utilização das políticas públicas ambientais que proporcionem o cumprimento dos princípios constitucionais de prevenção e precaução, promovendo a busca da sustentabilidade ambiental em ecossistemas vulneráveis e de relevante importância à qualidade de vida no Planeta.

Assim, o objetivo aqui é, por meio de revisão bibliográfica e avaliação de parâmetros químicos encontrados em águas subterrâneas profundas provenientes de domínios hidrogeológicos carbonáticos - dados estes já publicados na literatura científica (MORGADO, 2012) - fazer uma análise política e técnica do marco regulatório brasileiro apontando-se para as lacunas desta normativa geral no que tange à proteção dos aquíferos cársticos.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A avaliação foi realizada com dados analíticos de amostras de água coletadas em 15 poços tubulares profundos situados nos aquíferos fissuro cársticos presentes nos limites geográficos do Distrito Federal, Centro-Oeste, Brasil. Todas as águas analisadas são utilizadas para abastecimento de núcleos populacionais e os poços tubulares encontram-se em regiões urbanas e semiurbanas, antropizadas (Figura 1).

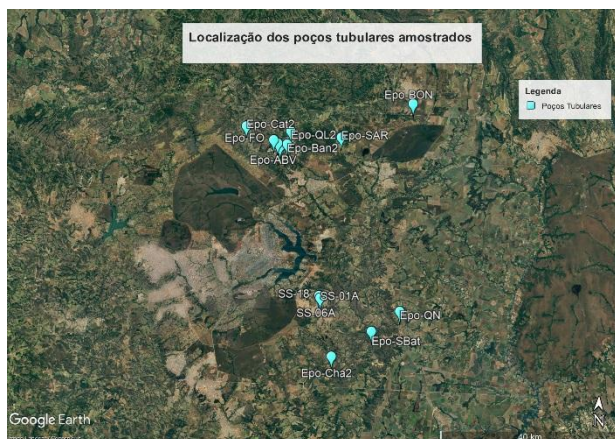


Figura 1 - Mapa com a localização dos poços tubulares amostrados no Domínio Fissuro Cárstico no DF.

Epo-Cha2	Canastra	F - Filito	206458	8227471
SS-06A	Canastra	F/Q/M – Calcifilitos-quartzitos-mármoreos	203222	8240518
SS-18	Canastra	F/Q/M – Calcifilitos-quartzitos-mármoreos	202876	8240620
SS-01A	Canastra	F/Q/M – Calcifilitos-quartzitos-mármoreos	203158	8240121

O Domínio Aquífero Fissuro Cárstico é constituído pelas rochas metassedimentares proterozoicas de composição carbonática, que ocorrem na forma de lentes de calcários, dolomitos, margas e mármoreos, subjacentes ao Domínio Intergranular ou Poroso. Na área de estudo esse sistema aquífero ocorre com restrita continuidade lateral, interdigitado com litologias menos permeáveis, tais como siltitos argilosos, folhelhos ou filitos (CAMPOS, 2011). Esse domínio representa as vazões mais expressivas em poços individuais na região de estudo. A dissolução química das rochas, responsável pela porosidade, é limitada pela restrita circulação de água, em que as cavidades resultantes são inferiores a 3m de abertura (CAMPOS, 2011).

Tabela 2 - Localização dos poços de amostragem no Domínio Fissuro Cárstico no DF.

Código do Poço	Sistema Aquífero	Subsistema	UTM E	UTM N
Epo-QL2	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	194348	8276389
Epo-BON	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	221224	8284017
Epo-SAR	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	205662	8275654
Epo-EV1	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	191995	8273069
Epo-EV2	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	192181	8272816
Epo-Ban2	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	193738	8273428
Epo-ABV	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	191617	8273542
Epo-FO	Paranoá	PPC - Psamo-pelito carbonatada	190685	8274199
Epo-Cat2	Canastra	F - Filito	184438	8276848
Epo-QN	Canastra	F - Filito	221081	8238286
Epo-SBat	Canastra	F - Filito	215097	8233504

A campanha de coleta de amostras para este trabalho foi realizada em setembro/2010, após 5 meses sem chuvas. Foram determinados *in situ* os parâmetros físico-químicos: pH, condutividade elétrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (‰) e total de sólidos dissolvidos (mg/l). Para realizar a medição desses parâmetros utilizou-se os equipamentos *pH meter Shott Geratecg813* e *Conductivity/TDS meter da Hach Company CO-150*. Em seguida realizou-se o ensaio de alcalinidade para a determinação do ânion bicarbonato (HCO_3^-). As amostras foram então filtradas por membranas milipore de $0,45 \mu\text{m}$ e armazenadas para posterior análise química no Laboratório de Geoquímica (LAGEQ) no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , foram quantificados por Espectrometria de Emissão Atômica (ICP/AES Spectroflame-Fvmo3). Os cátions Na^+ e K^+ foram determinados através de espectrometria de emissão pela chama (*Perkim Elmer AAnalyst 200 Atomic Absorption Spectrometer*). Os ânions PO_4^{3-} , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- e Cl^- foram quantificados por cromatografia líquida de alta performance (*HPLC Dionex ICS-90 system*).

O tratamento estatístico utilizado foi o de Análise de Principais Componentes (APC). A Análise dos Principais Componentes foi realizada segundo FARNHAM e colaboradores (2003), em que os pesos dos parâmetros (*factor loading*) e os escores das amostras (*sample factor score*) são calculados em uma matriz correlação de acordo com a rotação varimax (VONDOURIS *et al.*, 1997). Os principais componentes selecionados foram aqueles com autovalores maiores que 1. A regressão múltipla foi realizada de acordo com DAVIS (1986), utilizando o método *forward selection*. O agrupamento hierárquico utilizou o método de WARD (1963), tendo como euclidiana a medida de distância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação dos Dados Analíticos dos Aquíferos Fissuro Cársticos

A metodologia da APC foi aplicada aos valores quantificados dos parâmetros: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ,

Mg²⁺, HCO₃⁻, F, Cl⁻, NO₃⁻, PO₃⁻⁴, SO₂⁻⁴, pH e Condutividade Elétrica (CE). A Análise dos Principais Componentes permitiu avaliar a correlação conjunta dos parâmetros analisados, determinando um agrupamento entre eles, de forma a facilitar a compreensão de suas origens. Este método resumiu todos os parâmetros analisados em três principais componentes. A Tabela 2 apresenta o agrupamento dos parâmetros de acordo com o peso dos fatores obtidos. O Componente 1 (PC1) agrupou os parâmetros K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻ pH e CE com os pesos mais elevados, acima de 0,8. O Componente 2 (PC2) agrupou Cl⁻ e NO₃⁻ com pesos maiores que 0,8. O Componente 3 (PC3) isolou o Na⁺ com peso maior que 0,6.

Os parâmetros F, PO₄ e SO₄ não apresentaram teores significativos nas amostras analisadas, portanto, nem obtiveram qualquer correlação na análise estatística APC.

Tabela 2 - Agrupamento de parâmetros de acordo com o peso dos fatores obtidos na APC.

Parâmetro	Componente		
	PC1	PC2	PC3
Na ²⁺	-0,011	0,022	0,681
K ⁺	0,948	-0,032	-0,069
Ca ²⁺	0,939	0,055	0,174
Mg ²⁺	0,909	-0,053	-0,177
HCO ₃ ⁻	0,972	-0,016	0,109
F	0,587	-0,046	0,356
Cl ⁻	0,101	0,953	-0,006
NO ₃ ⁻	-0,158	0,893	-0,147
PO ₃ ⁻⁴	0,091	-0,245	0,593
SO ₂ ⁻⁴	0,488	0,269	0,453
pH	0,836	-0,114	0,389
CE	0,977	0,013	0,125

Em seguida, foi realizado o agrupamento dos componentes por pontos de coleta, com o intuito de estabelecer correlações com a litologia do poço, que justificassem as concentrações dos elementos. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos, nos quais os positivos correspondem ao(s) componente(s) com maior expressão na composição química de determinado poço, demonstrando a quantidade de íons presentes em maiores quantidades nas águas provenientes de cada aquífero.

Tabela 3 - Agrupamento dos pontos amostrados de acordo com os escores das amostras obtidos.

Poço	PC1	PC2	PC3
Epo-QL2	2,41985	-0,77775	-2,21819
Epo-BON	0,91953	-0,44483	-0,90801
Epo-SAR	0,64916	-0,72553	0,49894

Epo-EV1	1,59056	0,10684	-0,18022
Epo-EV2	1,54724	0,07463	-0,29434
Epo-Ban2	1,04858	-0,34800	-0,35987
Epo-ABV	2,08311	1,97906	0,68206
Epo-FO	1,24480	-0,07128	1,56455
Epo-Cat2	1,05813	-0,32755	-1,22432
Epo-QN	-0,84290	-0,62196	-0,71129
Epo-SBat	-0,14780	0,45223	2,14028
Epo-Cha2	0,05203	-0,78972	0,29788
SS-06A	0,77546	0,05955	0,29857
SS-18	0,57271	1,28886	1,23325
SS-01A	0,63481	-0,50882	0,66095

O Componente 1 (PC1), por ter agrupado os cátions solúveis (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), o HCO₃⁻, pH e Condutividade Elétrica, representa águas ricas nos elementos provenientes da dissolução de rochas carbonáticas. As águas enriquecidas por esses elementos maiores e mais solúveis resultam em águas bicarbonatadas cálcicas-magnesianas (tipo Ca-Mg-HCO₃), com pH neutro (em torno de 6 a 7) e elevada condutividade elétrica, advinda das elevadas concentrações dos íons dissolvidos. Os pontos onde os valores desses parâmetros se mostraram elevados referem-se aos aquíferos pertencentes aos subsistemas PPC (Paranoá), F/Q/M (Canastra) e F (Canastra), que são compostos de rochas carbonáticas, calcárias e dolomíticas, caracteristicamente com elevada solubilidade.

A litologia do subsistema PPC é formada por metassiltitos com lentes calcárias e dolomíticas, enquanto o subsistema F/Q/M compõe-se de calcifilitos, quartzitos e lentes de mármore. Os filitos que compõem o Subsistema F possuem micas e cloritas em abundância, que enriquecem as águas com elevadas concentrações de Mg²⁺ e K⁺. A análise dos principais componentes agrupou dois poços deste subsistema junto aos poços que possuem águas com características de dissolução de minerais carbonáticos, como calcita e dolomita, já que sua assinatura hidroquímica é marcada também por elevadas concentrações de Ca²⁺ e HCO₃⁻.

O Ca²⁺ possui moderada a alta solubilidade e sua presença nas águas advém da dissolução dos minerais calcita e dolomita nas rochas calcárias, plagioclásios, e, subordinadamente, dos argilominerais, especialmente a esmectita. O Mg²⁺ apresenta propriedades similares às do Ca²⁺, entretanto, é mais solúvel e mais difícil de precipitar. Quando em solução, tem a tendência de nela permanecer, sob a forma iônica. O HCO₃⁻ nas águas é proveniente da dissolução das rochas carbonáticas, não sofre oxidação ou redução em

águas naturais, encontra-se em equilíbrio com carbonatos, água e CO_2 , porém, precipita com facilidade como carbonato de cálcio (CaCO_3).

O Componente 2 (PC2) agrupou concentrações elevadas dos íons Cl^- e NO_3^- . É comum a ocorrência de cloreto (Cl) nas águas de infiltração e nas águas subterrâneas do Distrito Federal, uma vez que essa substância é residual de diversos produtos e aplicações industriais, tais como a produção de papel, antissépticos, corantes, alimentos, inseticidas, tintas, produtos petrolíferos, plásticos, medicamentos, têxteis, solventes. O Cl também é expelido através da urina (cerca 4 g de cloreto por dia), fezes e pelo suor. Portanto, elevadas concentrações de cloreto nas águas são indicativas de atividades antrópicas, e não naturais.

O nitrato (NO_3) representa o estágio final da oxidação da matéria orgânica. Trata-se de um composto muito móvel, mas ocorre em pequeno teor nas águas naturais, uma vez que este composto não pode ser encontrado na forma livre e tampouco advindo da dissolução dos minerais presentes nos solos ou rochas (DREVER, 1988; KEHEW, 2001).

O Componente 3 (PC3) representa elevada concentração de Na^+ nas águas, que em geral, pode estar relacionada tanto a fatores geológicos quanto contribuição antrópica. Entretanto, na litologia dos aquíferos cársticos/fissuro cársticos estudados não existe a presença dos arcóseos, ou outros minerais solúveis ricos em sódio (Na). É possível inferir, portanto, que o Componente 3 representa teores residuais de atividades antrópicas nas águas subterrâneas, sobretudo pelo fato de os poços estarem localizados em regiões antropizadas, onde existem condomínios residenciais urbanos e rurais, sem a presença de uma rede coletora de esgotos e no qual todos os efluentes domésticos são destinados a fossas subterrâneas. O nitrato de sódio é frequentemente aplicado como adubo sintético. O hidróxido de sódio é utilizado para evitar o entupimento de tubos de esgoto, e o carbonato de sódio é aplicado na purificação de água para neutralizar os ácidos. O hidrocarbonato de sódio é um componente do pó de suporte e é aplicado nas indústrias têxtil e de couro e na produção de sabão e limpeza. No limpador sanitário, o elemento está presente como hipoclorito de sódio (PATTERSON, 1997).

3.2 Discussão crítica sobre a atualização do quadro normativo que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas

A água é uma substância composta e possui estrutura molecular dipolar, o que lhe confere a característica de ser um forte solvente. Quando em

contato com os minerais constituintes dos solos e rochas nos quais circula, é capaz de incorporar grandes quantidades de substâncias presentes nos mesmos.

As águas das chuvas, após infiltrarem, elevam seus teores de ácido carbônico (H_2CO_3) naturalmente ao reagirem com altas concentrações de CO_2 proveniente das reações bioquímicas no solo, da respiração das raízes das plantas e da decomposição da matéria orgânica. No entanto, a depender dos elementos contaminantes presentes na superfície devido ao uso do solo, como por exemplo a presença de fossas sépticas ou lavouras com uso de agroquímicos, a tendência é que essa água se torne ainda mais ácida e, à medida que vai infiltrando e reagindo com o CO_2 do solo, eleva seu poder corrosivo. Isso ocorre porque o pH das águas é controlado pelas reações ácido-base, dentre as quais as mais significativas envolvem o CO_2 , as espécies dissolvidas do carbono inorgânico (CO_3^{2-} e HCO_3^-).

Águas com altos níveis de CO_2 dissolvem carbonatos na seguinte ordem decrescente de solubilidade: magnesita (MgCO_3), aragonita (CaCO_3), calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$), siderita (FeCO_3) e rodocrosita (MnCO_3). Ao dissolver esses minerais, sobretudo os mais solúveis, a água subterrânea de aquíferos cársticos se torna enriquecida em bicarbonato de cálcio e magnésio, e, conseqüentemente mais básica. Tais reações tendem a aumentar a porosidade cárstica destes aquíferos.

Assim, fica evidente a importância da preservação dos sistemas cársticos para as águas subterrâneas onde predominam as referidas litologias. Para o sociólogo, pesquisador e professor alemão Ulrich Beck, o desenvolvimento traz como conseqüências um conjunto de riscos que não podem ser contidos espacial ou temporalmente. Em sua teoria, publicada poucos meses antes do acidente nuclear de Chernobyl, o risco seria um estágio intermediário entre a segurança e a destruição. Assim, a percepção dos riscos ameaçadores é determinante para direcionar o pensamento e a ação (BECK, 1992).

O conceito de Desenvolvimento Sustentável refere-se ao desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades (ONU, 1987). Dessa maneira, tomando-se por referência a teoria acima exposta e o conceito para se atingir o desenvolvimento sustentável, e os eventos recentes de flexibilização da legislação infraconstitucional específica sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, é importante que pesquisadores, comunidades espeleológicas e as

instituições científicas que desenvolvem estudos nas cavidades naturais brasileiras possam estar presentes nos processos de tomada de decisão política que irão impactar diretamente e indiretamente estes sistemas vulneráveis. Ações como essa são de fundamental importância para que a legislação espeleológica, ao definir os parâmetros direcionadores do licenciamento ambiental de obras e empreendimentos que impactarão diretamente e/ou indiretamente os ambientes cársticos, possa conciliar o uso dos recursos que são essenciais para a nossa sociedade com a proteção desse patrimônio natural de danos irreversíveis e irremediáveis.

Dito de outra maneira, as políticas públicas que impactam diretamente o meio ambiente, a qualidade ambiental e conseqüentemente os riscos à sobrevivência humana, deveriam nascer de um engajamento científico e de uma preferência em expressar problemas ambientais em termos técnicos.

4. CONCLUSÕES

Os elementos Na, NO₃ e Cl foram detectados em diferentes aquíferos sem haver qualquer correlação com a geologia local. Tais elementos agrupados pela análise estatística multivariada, juntamente com a condutividade elétrica categorizou este grupo de amostras como tendo contribuição antrópica, já que os referidos ânions não podem ser provenientes da mineralogia associada aos aquíferos fissuro cársticos.

Assim sendo, pelos resultados apresentados e pela análise descritiva dos dados é possível afirmar que os aquíferos fissuro cársticos na região estudada estão sendo impactados pelas atividades antrópicas.

O uso de fossas sépticas ou negras constitui uma das principais causas de contaminação das águas subterrâneas (TUCCI & CABRAL, 2003; TUCCI, 2008). O chorume e os efluentes oriundos dessas fontes percolam através dos solos e do lençol freático por fluxo vertical até atingir a zona saturada

dos aquíferos cársticos, onde seguem por fluxos laterais e regionais espalhando os contaminantes nas águas profundas (TUCCI & CABRAL 2003; LOUSADA & CAMPOS 2005).

Frente às particularidades do ambiente cárstico, e dos potenciais riscos inerentes de obras e empreendimentos aos aquíferos presentes nesse ecossistema, bem como das suas conseqüências ambientais, a ordem jurídica brasileira, manifestada na legislação infraconstitucional específica sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, não está contribuindo para a efetiva proteção do mesmo.

A flexibilização da legislação ambiental que trata da proteção dos sistemas cársticos no território nacional, dá permissão ao órgão ambiental responsável pelo licenciamento para autorizar atividades e empreendimentos com a existência de cavernas em suas áreas diretamente afetadas, o que potencialmente poderá causar a destruição total ou parcial das mesmas. Ainda que sejam impostas medidas compensatórias e que os impactos negativos irreversíveis não gerem a extinção de espécie que conste na cavidade impactada, tais atividades/ empreendimentos/ obras oferecem potenciais riscos de contaminação dos aquíferos cársticos, agravados pela elevada solubilidade das rochas carbonáticas formadoras destes sistemas, em constante dissolução pela ação da água que nela percola, somada ao aumento do poder corrosivo das águas mais ácidas enriquecidas com elementos provenientes das atividades antrópicas.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Geoquímica (LAGEQ/UnB) e ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB) pelo suporte logístico e operacional nos trabalhos de campo e laboratoriais. Ao professor Geraldo Rezende Boaventura, pela orientação na pesquisa.

REFERÊNCIAS

BECK, U. **Risk Society, Towards a New Modernity**. Sage(London):260. 1992.

CAMPOS, J. E. G. **Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal**. Volume II: Meio Físico. SEDUMA, GDF. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br/>. 2011.

COVINGTON, M. D.; WICKS, C. M.; SAAR, M. O. A dimensionless number describing the effects of recharge and geometry on discharge from simple karstic aquifers. **Water Resources Res.**, 45, 1–16, 2009.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. 2nd ed. John Wiley & Sons. New York. 1986.

- DREVER, J. I. **The Geochemistry of Natural Waters**. 2nd edition. Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- FARNHAM, I. M.; JOHANNESSON, K. H.; SINGH, A. K.; HODGE, V. F. & STETZENBACH, K. J. Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. **Analytica Chimica Acta**. 490:123-138. 2003.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data**. CEPIS/PAHO Technical Report Lima/Peru, 78p. 1998.
- FRANTZ, L. C. **Avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero Guarani no perímetro urbano da cidade de Sant’ana do Livramento-RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- FRISTZONS, E.; RIZZI, N.; BITTENCOURT, A.V.L.; MANTOVANI, L. E. Estudo do impacto de contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 49, p. 39-52, 2001.
- KARMANN, Ivo. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- KEHEW, A. E. **Applied Chemical Hydrogeology**. Upper Saddle River, N. J.: Prentice-Hall. 368p. 2001.
- LOUSADA E. O. & CAMPOS J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geociências**, 35(3):407-414, 2005
- MACHADO, P. A. L. Constituição Federal e Meio Ambiente. **Direito Ambiental Brasileiro**, v. São Paulo, n. ISBN: 9788539204014, p. 1430, 2018.
- MORGADO, M. G. A. **Hidroquímica das águas subterrâneas do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 131 f., il. 2012.
- MORGADO, M. G. A. **Contaminação química de ecossistemas aquáticos e (in)sustentabilidade ambiental na Amazônia: estudo de caso na região metropolitana de Santarém, Pará**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, vi, 123 f., il. 2019.
- ONU. Relatório Brutland ‘Nosso Futuro Comum’. **Oxford University Press** Comissão M:383. 1987.
- PATTERSON, R. A. Domestic Wastewater and the Sodium Factor, Site Characterization and Design of On-Site Septic Systems, ASTM STP 1324, M.S. Bedinger, A.I. Johnson, and J.S. Fleming, Eds., **American Society for Testing and Materials**, pp 23 – 35, 1997.
- TUCCI, C. E. M. & CABRAL, J. **Qualidade da Água Subterrânea**. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. 53 p, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas. Estudos Avançados**, vol.22, n.63, pp.97-112. ISSN 0103-4014. 2008.
- VALLE, M. A. **Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias de Irecê e Salitre): um exemplo da ação de ácido sulfúrico no sistema cárstico**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2004.
- VOUDOURIS, K.; LAMBRAKIS, N.; PAPTAEODOROU, G. & DASKALAKI, P. An application of factor analysis for the study of the hydrogeological conditions in Plio-Pleistocene aquifers of NW Achaia (NW Peloponnesus, Greece). **Math. Geology**. 29(1):43–59. 1997.



WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of American Statistics Association.** 69:236-244. 1963.