



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**HIDROGEOLOGIA E RISCO GEOLÓGICO EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS PROTEROZOICAS: PORÇÃO CENTRAL  
DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA, BRASIL**

**LUCAS DE QUEIROZ SALLES**

SALVADOR

2017

**HIDROGEOLOGIA E RISCO GEOLÓGICO EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS PROTEROZOICAS: PORÇÃO CENTRAL  
DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA, BRASIL**

**Lucas de Queiroz Salles**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI - UFBA.

S168 Salles, Lucas de Queiroz  
Hidrogeologia e risco geológico em rochas carbonáticas Proterozoicas: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil / Lucas de Queiroz Salles. – Salvador, 2017.  
87 f.

Orientadora: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, 2017.

1. Hidrogeologia. 2. Geomorfologia. 3. Aquíferos. 4. Rochas Carbonáticas. I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDU 556.3


---


LUCAS DE QUEIROZ SALLES


**“HIDROGEOLOGIA E RISCO GEOLÓGICO EM ROCHAS  
CARBONÁTICAS PROTEROZOICAS: PORÇÃO CENTRAL  
DA CHAPADA DIAMANTINA, BAHIA, BRASIL”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 10/03/2017.

**DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Luiz Rogério Bastos Leal**  
Orientador – UFBA

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Fernando Verassani Laureano**  
Examinador Externo – PUC MG

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento**  
Examinador Interno – UFBA

Salvador – BA  
2017

*À família, com muito carinho.*

## AGRADECIMENTOS

É difícil agradecer a todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte da minha vida e me trouxeram a esse momento, por isso, primeiramente agradeço a todos de todo coração.

A meus pais, Relma e Orlando, a minha irmã e minha segunda mãe, Ninha, pelo amor incondicional e total apoio e confiança. Serei eternamente grato a vocês.

A minha princesa, Vanessinha, pelo apoio nas horas mais difíceis e compreensão em toda essa jornada.

A família, minha vó, Regina, meus tios, dindos e primos.

Ao mestre, Johildo, com carinho, pelos ensinamentos que levarei comigo pelo resto de minha vida.

Aos meus orientadores, e grandes amigos, Luiz Rogério e Ricardo Fraga.

Meus irmãos de rocha, em especial a Tiagão, Maurinho, Thiago Cajazeiras, Pockete, Ramena, Carlos Calabresa, Jailma, pró Renilda e Joildinho.

Ao corpo docente do Instituto de Geociências da UFBA pela dedicação e contribuição na minha formação, em especial aos professores (as) Ângela, Carlson, Osmário, César, Simone, Ernande, Moacyr, Sergio, José Ângelo, Danilo, Hailton, Natanael e Nathali.

Ao professor Cícero da Paixão, pelos ensinamentos.

Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente –NEHMA - por fornecer grande parte da viabilidade desse projeto, e todos os colegas integrantes: Gerson, Carla, Raissão, Rivaldo, Chate, Jean, Rebelde, Cesar, Rasta, Matheus, Raquel, Amâncio e Marcelo.

Ao Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia.

Ao Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas pelos mapas de cavernas cedidos para a realização dessa pesquisa, em especial ao professor Fernando Laureano.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento das pesquisas.

Aos membros da banca, pelas contribuições nesse trabalho.

A todos vocês meu muito obrigado e eterna gratidão.

## RESUMO

O aquífero carbonático Proterozoico Salitre, situa-se na porção meridional da microrregião de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil, e compõe um importante sítio espeleológico do país. A água subterrânea, particularmente em regiões áridas e semiáridas, consiste em um valioso recurso no abastecimento hídrico da população rural. O declínio ou deterioração em sua qualidade é considerado um problema crucial para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Essa região é palco de importantes descobertas científicas, particularmente relacionados a espeleologia e evolução do sistema carstico. Entretanto, como os aspectos morfológicos interagem com os parâmetros hidrogeológicos e o entendimento dos processos de salinização atuantes, consistem numa importante lacuna do conhecimento atual. Devido a isso, esse trabalho discute como a evolução morfológica do relevo influencia no funcionamento hidrogeológico do aquífero, os possíveis processos de salinização da água subterrânea, bem como propõe a sumarização de áreas com risco geotécnico semelhantes, no município de Iraquara/BA. Para isso, foi realizada uma investigação hidrogeológica utilizando dados geoquímicos e isotópicos ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) coletados em jun/2015, observações de campo, mapa de fenômenos cársticos, além de informações do banco de dados da Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia – CERB. Os dados de capacidade específica apresentaram dois intervalos de maior produtividade: o primeiro para poços com menos de 60 metros de profundidade, e o segundo para poços com profundidade variando entre 91 e 120, sugerindo uma maior conexão hidráulica nesses intervalos de classe. Dados hidrogeoquímicos e isotópicos mostram que a deterioração da água subterrânea está sujeita a processos geológicos decorrentes da interação água rocha, e a atividades antrópicas, como despejo indevido de lixo e esgoto. A evolução morfológica no sistema carstico é intrínseca à coalescência de diversos processos, que conotam características hidrogeológicas, morfológica e geotécnicas peculiares a esse sistema. O uso integrado da geoquímica e de isotópicos estáveis, em aquíferos carbonáticos Proterozoicos, mostrou-se um importante instrumento na modelagem e entendimento dos processos de salinização da água subterrânea.

Palavras-chave: Hidrogeologia; Geomorfologia; Aquífero Carbonático Proterozoico, Risco Geotécnico.

## ABSTRACT

The carboniferous aquifer Proterozoic Salitre, is located in the southern portion of the microregion Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brazil, and composes an important speleological site of the the country. Groundwater, particularly in arid and semi-arid regions, is a valuable resource in the water supply for rural population. Declining or deteriorating water quality is considered a crucial problem for the management of groundwater resources. This region is the scene of important scientific discoveries, particularly related to caving and evolution of the karst system. However, the understanding of the relationship between morphology and underground hydraulics and the salinization processes, are an important gap in the current knowledge. This work discusses how the morphological evolution of the landscape conditions and interacts with the hydrogeological functioning of the aquifer, and the implication to gronewater salinization, as well as proposes the summarization of areas with similar geotechnical risk, in the municipality of Iraquara / BA. For this, a hydrogeological investigation was carried using geochemical and isotopic data ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) collected in June / 2015, field observations, map of karst phenomena, and information from the database of the Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia - CERB. The specific capacity data presented two ranges of higher productivity: the first for wells with less than 60 meters depth, and the second for wells with depth ranging between 91 and 120, suggesting a greater hydraulic connection in these class intervals. Hydrogeochemical and isotopic data show that deterioration of groundwater is subject to geological processes, due to the interaction of rock water, and to anthropic activities, such as improper dumping of waste and sewage. The morphological evolution in the karst system is intrinsic to the coalescence of several processes, which connotes hydrogeological characteristics, morphologies and geotechnics peculiar to this system. The integrated use of geochemistry and stable isotopes in Proterozoic carbonate aquifers has proved to be an important instrument in the modeling and understanding of groundwater salinization processes.

**Keywords:** Hydrogeology; Geomorphology; Proterozoic Carboniferous Aquifer Geotechnical Risk.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 2- DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	14
<b>CAPÍTULO 3 - ARTIGO 1:</b> Influência da Evolução Morfológica nos Aspectos Hidrogeológicos de Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.....	19
<b>CAPÍTULO 4 - ARTIGO 2:</b> Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ ) Aplicadas no Entendimento do Processo de Salinização da água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidencia do Semiárido do Nordeste Brasileiro.....	39
<b>CAPÍTULO 5 - ARTIGO 3:</b> Avaliação de risco geotécnico, associado ao colapso e subsidência em áreas cársticas, no município de Iraquara, Chapada Diamantina, Brasil.....	64
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b> .....	80
<b>APÊNDICE A</b> – Justificativa da participação dos autores no artigo 1.....	84
<b>APÊNDICE B</b> - Justificativa da participação dos autores no artigo 2.....	85
<b>APÊNDICE C</b> - Justificativa da participação dos autores no artigo 3.....	86

# CAPÍTULO 1

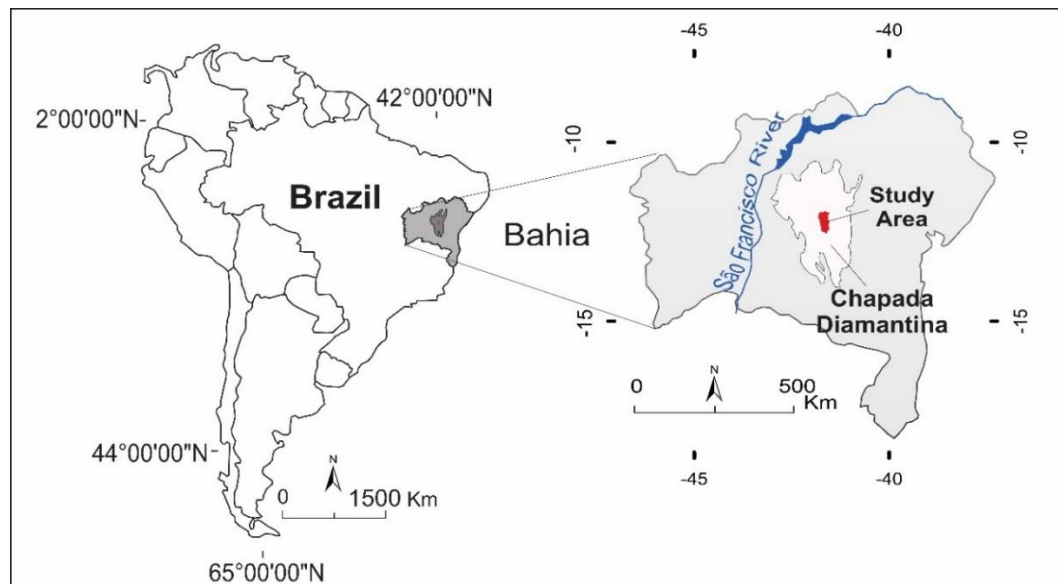
## INTRODUÇÃO GERAL

---

Nesse item estão descritos a apresentação do trabalho, seus objetivos, bem como estrutura apresentada nessa dissertação.

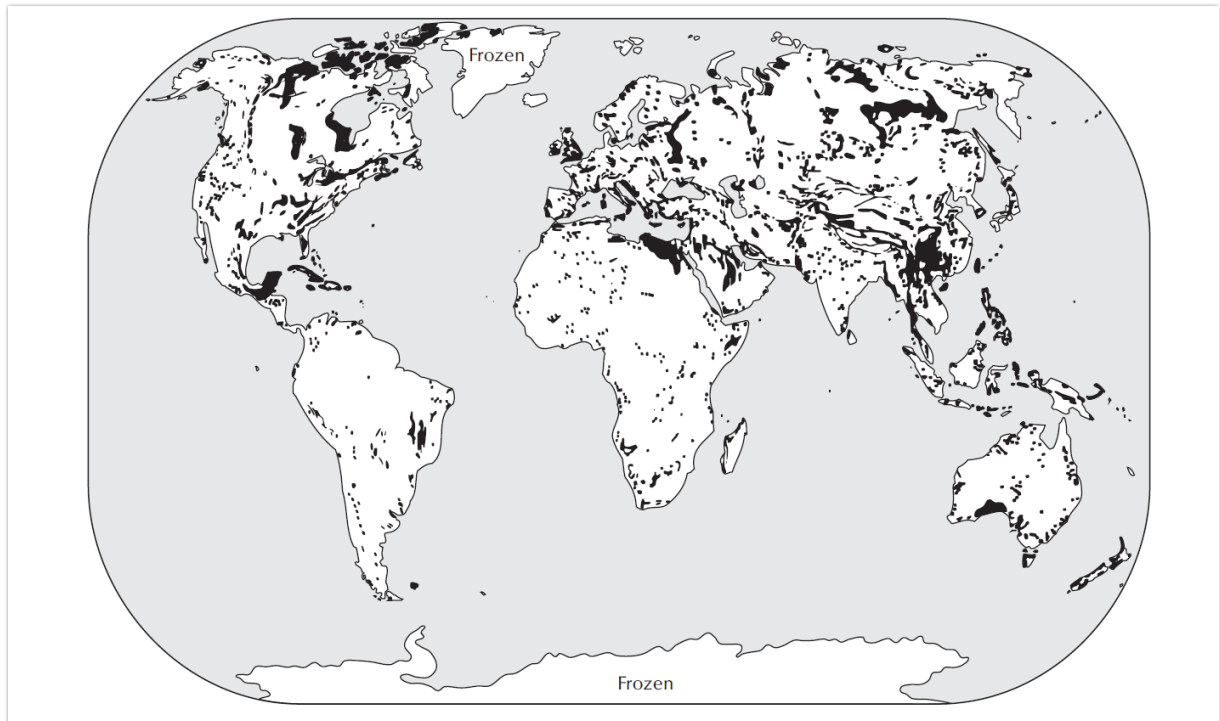
### 1.1 Apresentação

Essa dissertação é resultado de uma pesquisa integrada sobre a geologia, geomorfologia, geoquímica, estudos de isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{13}\text{C}$ ), petrografia e análise de risco geotécnico na porção Meridional da Bacia de Irecê (**Figura 1**). Geologicamente, a área de estudo está inserida no panorama central do Estado da Bahia, tendo como modelo evolutivo um padrão estrutural do tipo aulacógeno (Souza et al. 1993), denominada de Cinturão de Dobramentos e Cavalgamentos da Chapada Diamantina Ocidental. O alvo desse estudo são as rochas carbonáticas da Formação Salitre, que juntamente com a Formação Bebedouro compreendem uma sequência de rochas terrígenas-carbonáticas denominadas de Grupo Una (GU), depositados durante o neoproterozoico. Esse grupo repousa discordantemente sobre os metassedimentos da Chapada Diamantina (Misi, 1979; Bonfim et al., 1985; Pedreira 2004).



**Figura 1:** Mapa de Localização da área de estudo.

Morfologicamente, as rochas carbonáticas da Formação Salitre podem ser classificadas como um carste exumado parcialmente coberto, contendo cavernas e um expressivo sistema de condutos subterrâneos, desenvolvidos a partir da dissolução da rocha carbonática. Terrenos cársticos cobrem aproximadamente 20% da superfície do planeta (**Figura 2**), onde cerca de 22% da população mundial depende direta ou indiretamente dos recursos hídricos subterrâneos nessas áreas (Ford e Williams, 2007).



**Figura 2:** Distribuição global das principais rochas carbonáticas aflorantes (Ford e Williams, 2007).

A porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil é palco de importantes descobertas científicas, principalmente aquelas relacionadas a mudanças paleoambientais (Barreto, 2010; Bicuetta et al., 2015; Laureano et al., 2016), e caracterizações hidrogeológicas de caráter regional (Guerra, 1986; Negrão, 1987; Valle, 2004). Entretanto, como os aspectos morfológicos atuais interagem com os parâmetros hidrogeológicos e o entendimento dos processos de salinização atuantes, consistem numa importante lacuna do conhecimento atual. Dificultando uma boa gestão dos recursos hídricos, em um ambiente caracterizado pela crise hídrica.

## 1.2 Objetivos e Justificativa

Os objetivos propostos nessa dissertação podem ser divididos em gerais e específicos. Como objetivo geral, pretende-se compreender se a evolução morfológica do modelado carstico influencia em seus aspectos hidrogeológicos, bem como compreender os processos hidroquímicos presentes na área. Já os objetivos específicos são: (i) definir a direção do fluxo subterrâneo; (ii) avaliar a interação água rocha; (iii) compreender a evolução do sistema cárstico; (iv) compreender os possíveis processos de salinização da água subterrânea; e (v) delimitar zonas com diferentes graus riscos geotécnicos, associados ao colapso e subsidências em áreas cársticas, no município de Iraquara. Adicionalmente, ressalta-se que escassez de água na região, associada à elevada demanda por recursos hídricos subterrâneos, torna necessário conhecer as potencialidades do aquífero, suas propriedades e qualidades físico-química e química da água. Devido a essa elevada demanda, deve-se levar em consideração os diferentes graus de risco geotécnico, associados a nucleação de novas dolinas, na região. Visto que, atividades humanas podem acelerar esse fenômeno natural, acarretando em perdas financeiras e ambientais.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Essa dissertação é organizada no formato de artigo, onde cada capítulo (a partir do capítulo 3) corresponde a um artigo independente. O capítulo 1 apresenta uma introdução ao trabalho. Já o capítulo 2 corresponde a descrição física da área de trabalho.

O capítulo 3 corresponde ao artigo intitulado “Influência da evolução morfológica nos aspectos hidrogeológicos de aquíferos carbonáticos Proterozoicos: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil”, submetido a Revista Brasileira de Geomorfologia (**Apêndice A**). Esse trabalho discute como a evolução morfológica da região influencia em seus aspectos hidrogeológicos. Bem como, as características hidrogeologias atuais do aquífero ajudam na composição da história do relevo cárstico.

O capítulo 4 consiste no artigo denominado “Ferramentas hidrogeoquímicas e isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) aplicadas no entendimento do processo de salinização da água subterrânea em aquíferos carbonáticos Proterozoicos: Evidencia do semiárido do Nordeste Brasileiro”, a ser submetido a revista *Applied Geochemical* (**Apêndice B**). Nesse artigo é reportado múltiplas

ferramentas hidroquímicas e isotópicas, visando uma melhor compreensão dos processos hidrogeoquímicos e de salinização da água subterrânea.

Já o capítulo 5 é composto pelo artigo “Avaliação de risco geotécnico, associado ao colapso e à subsidência em áreas cársticas, município de Iraquara, Chapada Diamantina, Brasil”, a ser submetido a revista *Environmental Earth Science*. Esse trabalho teve como objetivo delimitar zonas com diferentes graus de riscos geotécnicos, associados ao colapso e subsidência de dolinas, no município de Iraquara. Bem como, compreender seus fatores determinantes.

Por fim, o capítulo 6 consiste nas conclusões gerais desse trabalho.

## Referências

- Barreto E. A. S., 2010. Reconstituição da pluviosidade ad Chapada Diamantina (BA) durante o Quaternário tardio através de registros isotópicos (O E C) em estalagmites. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP.
- Bichuette M. E.; Rantin B., Hingst-Zaher E.; Trajano E., 2015. Geometric morphometrics throws light on evolution of the subterranean catfish *Rhamdiopsis krugi* (Teleostei: Siluriformes: Heptapteridae) in eastern Brazil. *Biological Journal of the Linnean Society*, 114, 136–151.
- Bomfim L. F. C., Rocha A. J. D., Pedreira A. J., Morais Filho J. C., Guimarães J. T., Tesch N. A., 1985. Projeto Bacia de Irecê. Relatório Final. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM.
- Ford, D.C., Williams, P.W, 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Geography. Second Edition.
- Guerra A. M, 1986. Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Bahia. Tese de Doutorado. Programa de Geologia de Aplicação – USP.
- Laureano, F. V., Karmann, I., Granger, D. E., Auler, A. S., Almeida, R. P., Cruz, F. W., Stricks, N. M., Novello, V. F., 2016 Two million years of river and cave aggradation in NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution. *Geomorphology* 273, 63–77.
- Misi, A., 1979. Grupo Bambuí no Estado da Bahia. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1, 119-154.
- Negrão, F. I. Caracterização Hidroquímica e Vulnerabilidade do Sistema Hidrogeológico Cárstico da Região de Irecê, 1987. Tese de doutoramento, USP, São Paulo – SP, 107p.

Pedreira A.J., 2004. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo.

Souza, S. L., Brito, P. C. R., Silva, R. W. S., 1993. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM.

Valle, M. A. Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias De Irecê E Salitre): um Exemplo da Ação de Ácido Sulfúrico no Sistema Cárstico, 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

## CAPÍTULO 2

### DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

---

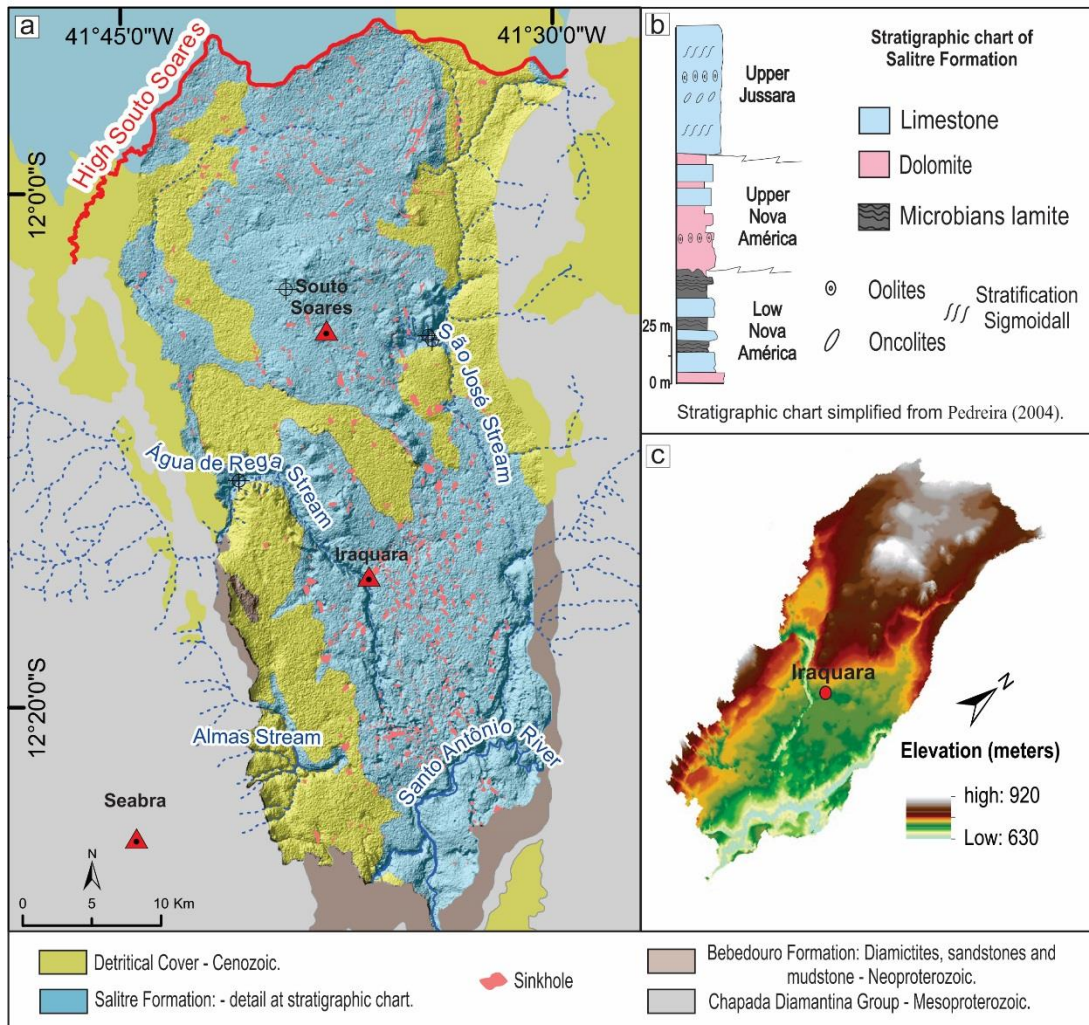
A área de estudo está localizada na porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (**Figura 1**). Para Auler e Ferrant (1996) as redes de galerias existentes na região compõem um dos mais relevantes sítios espeleológicos do país, constituindo possivelmente, o local de maior densidade de galerias subterrâneas, por unidade de área, do Brasil. Geologicamente, apresenta um modelo evolutivo estrutural do tipo aulacogênico (Souza *et al.* 1993). Corresponde a um grande sinclinal de eixo aproximadamente N-S, cujo a nucleação sucedeu-se durante o primeiro evento do Ciclo Brasileiro. O sistema de dobramentos superposto a essa estrutura apresenta vergência tectônica para sul, relaciona-se a uma fase de deformação progressiva. (Lagoeiro, 1990; Danderfer Filho 1990; Kachenbecker *et al.*, 2011).

Na região, afloram unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas, predominantemente de natureza siliciclásticas que compõem o Grupo Chapada Diamantina e uma espessa sequência carbonática-pelítica neoproterozoica correspondente ao Grupo Una (**Figura 2**) (Misi 1979; Bonfim *et al.*, 1985; Souza *et al.* 1993, Souza *et al.* 2002, Pedreira, 2004). Recobrando essas unidades são mapeadas coberturas detrito-lateríticas cenozoicas, relacionadas, possivelmente, às superfícies de aplainamento Velhas e Paraguaçu (King, 1956; Barbosa, 1959; Ab'Saber, 1962), que conotam uma morfologia de platô dissecado esculpido a partir de sucessivos ciclos de aplainamento.

O Grupo Una corresponde a uma sequência carbonática-pelítica formada da base para o topo, pelas Formações Bebedouro e Salitre. A Formação Bebedouro é constituída predominantemente por metassiltitos, metargilitos e metadiamicititos. Já a Formação Salitre, hospedeira do aquífero carbonático, alvo do estudo, é constituída predominantemente por calcissiltitos, dolomitos e lamitos algais fracamente ondulados na base, gradando para calcilitos, calcarenitos, dolarenitos e dololutitos oolíticos no topo, e na região de Iraquara compõem as unidades litoestratigráficas, do topo para a base: Jussara Superior, Nova América Superior e Nova América Inferior (**Figura 2**) (Souza *et al.* 1993).

O aquífero carbonático de Irecê é um aquífero livre, associado às rochas neoproterozoicas do Grupo Uma. As características geomorfológicas são de suma importância no estudo de uma bacia hidrogeológica, pois se relacionam com as áreas de recarga e de descarga de água dos aquíferos. A geomorfologia da bacia de Irecê de acordo com Bastos Leal

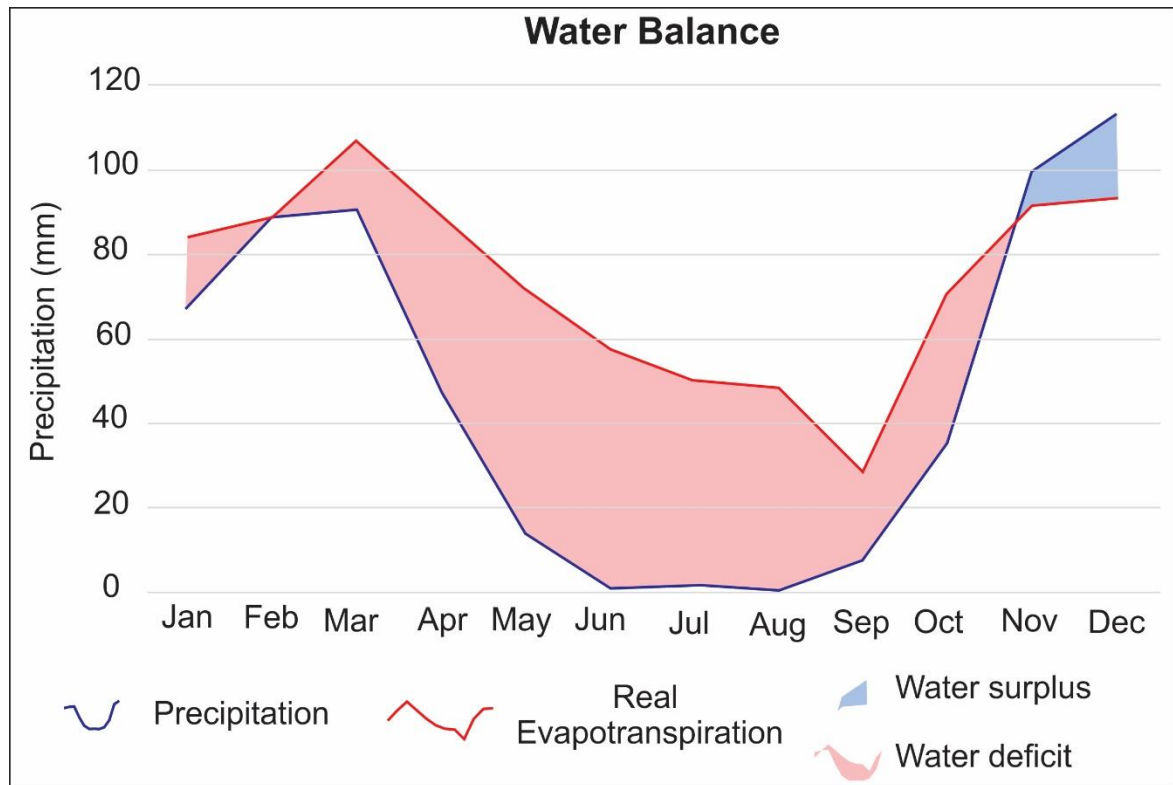
e Silva (2004), apresenta um modelado compreendido por uma região serrana, com altitude de até 1.200m e um platô ou pediplano com topografia variando de 400m a 800m.



**Figura 2:** (a) Mapalitológico simplificado (IBGE/SEI, 2013); (b) Coluna estratigráfica simplificada de Pedreira, (2004); (c) Modelo digital de elevação para a área de estudo.

A região é caracterizada por um clima semiárido, com uma série histórica de chuva média anual na ordem de 667,756 mm (período de janeiro de 1973 a dezembro de 2015). A temperatura média anual é de 22,81 °C, com umidade relativa em torno de 53,06 % (INMET, 2016).





**Figura 3:** Balanço Hídrico para a estação de Irecê entre os anos de 1973 e 2015. Para a confecção desse diagrama foram utilizadas a média mensal de precipitação para o período supramencionado. Fonte: INMET, 2016.

O balanço hídrico demonstrado na **Figura 3** evidencia a crise hídrica na região. Entre os meses de janeiro a outubro ocorre déficit hídrico. Por outro lado, o superávit hídrico está limitado, apenas, aos meses de novembro e dezembro.

## Referências

- Ab'saber, A. N. Compartimentação topográfica e domínios de sedimentação Pós-Cretácios do Brasil, 1962. 80f. Tese (Concurso para a cadeira de Geografia Física) - Depto. Geografia, Universidade Federal do Paraná.
- Auler, A. S., Farrant, A. R., 1996. A Brief Introduction to Karst and Caves in Brazil. Univer. Britl Speloca. Soc. Volume 20, 187-200.
- Barbosa, O. Quadro provisório das superfícies de erosão e aplainamentos no Brasil, 1959. Notícia Geomorfológica, São Paulo. n. 4, p. 31- 33.
- Bastos Leal L. R., Silva H. P, 2004. Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré- região semi-árida do estado da Bahia. Relatório Técnico Final do Convênio 002/02, SRH/UFBA/FAPEX.v.1, 361 p.

- Bomfim L. F. C., Rocha A. J. D., Pedreira A. J., Morais Filho J. C., Guimarães J. T., Tesch N. A., 1985. Projeto Bacia de Irecê. Relatório Final. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM.
- Danderfer Filho A. Análise Estrutural Descritiva e Cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil, 1990. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto. 99p.
- IBGE/SEI. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. 2003.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), accessed in December 2015. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.
- Kachenbecker M.; Reis H. L. S.; Fragozo D. G. C., 2011 Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do Cráton do São Francisco (BA). *Geonomos* 19(2), 42-49.
- King, L.C. A Geomorfologia do Brasil Oriental, 1956. *Rev. Bras. Geogr.* 18:147-265.
- Lagoeiro, L. E. Estudo da Deformação nas Sequências Carbonáticas do Grupo Una na Região de Irecê, BA, 1990. Ouro Preto, UFOP, Escola de Minas, Dep. de Geologia. Dissertação de Mestrado.
- Misi, A., 1979. Grupo Bambuí no Estado da Bahia. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1, 119-154.
- Pedreira A.J., 2004. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Souza S.L., Toledo L.A.A., Brito P.C.R., Fróes R.J.B.; Silva R.W.S., 2002. Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, v. 1.
- Souza, S. L., Brito, P. C. R., Silva, R. W. S., 1993. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM.
- Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH), 1995. Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacias dos Rios Verde e Jacaré. Margem Direita do Lago de Sobradinho.

## CAPÍTULO 3

# Influência da Evolução Morfológica nos Aspectos Hidrogeológicos de Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil.

---

### Resumo

O presente trabalho discute como a evolução morfológica do modelado condiciona e interage com o funcionamento hidrogeológico do aquífero carbonático Proterozoico situado na porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. O sistema cárstico ali presente abriga um conjunto de sítios espeleológicos relevantes do país. A região é palco de importantes descobertas científicas, particularmente relacionados à espeleologia e evolução dos terrenos cársticos. Entretanto, a compreensão das relações existentes entre a morfologia e a hidráulica subterrânea ainda estão pouco exploradas. Com esse intuito, foram realizados estudos comparativos entre as feições morfológicas do terreno e dados de capacidade específica de poços tubulares, apoiados por dados hidrogeoquímicos e de isótopos estáveis ( $\delta^{13}C$ ). As feições superficiais do terreno mostraram correlação com os dados de capacidade específica, principalmente levando em consideração a distribuição de dolinas. Já quando comparados com a profundidade, os dados de capacidade específica apresentaram dois intervalos de maior produtividade: o primeiro para poços com menos de 60 metros de profundidade, e o segundo para poços com profundidade variando entre 91 e 120, sugerindo uma maior conexão hidráulica nesses intervalos de classe. A evolução morfológica no sistema cárstico em estudo é, provavelmente, intrínseca a coalescência de dois processos de carstificação distintos, que denotam características hidrogeológicas particulares.

Palavras Chaves: Geomorfologia Cárstica, Aquífero Carbonático, Grupo Una-Bambuí.

### Abstract

The present study discusses how the morphological evolution of the modeling conditions and how it interacts with the hydrogeological functioning of the Proterozoic carbonate aquifer situated in the central portion of the Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. The karst system is characterized to a number of relevant speleological sites in the country. The region has been target of important scientific discoveries, particularly related to geoespeleology and evolution of karstic terrains. However, the understanding of the relationship between morphology and

underground hydraulics is still poorly explored. For this purpose, comparative studies were carried out between the morphological features of the terrain and specific capacity data of wells. The surface features of the terrain show a correlation with the specific capacity data, especially considering the distribution of dolines. When compared to depth, the specific capacity data presented two intervals of higher productivity: first for wells less deep than 60 meters depth, and second for wells with depth ranging between 91 and 120. This suggests greater hydraulic connection in these class intervals. The morphological evolution in the karst system is probably intrinsic to the coalescence of two distinct karstification processes, which denote hydrogeological characteristics peculiar to this system.

Key words: Karst Geomorphology, Carbonate Aquifer, Group Una-Bambuí.

## 1. Introdução

A evolução morfológica do sistema cárstico está vinculada à um conjunto de processos e fenômenos físicos e químicos, associados à interação água-rocha. Essa interação é responsável pelo desenvolvimento da porosidade terciária que condiciona a hidráulica subterrânea nos aquíferos carbonáticos. Na maioria das áreas cársticas, a evolução do sistema está ligada aos processos superficiais, sendo a caracterização geomorfológica um dos principais recursos para a compreensão hidrogeológica (FORD e WILLIAMS, 2007).

A dissolução química é o principal processo que associa a evolução do aquífero ao relevo cárstico. Esse ocorre pela combinação da água autigênica com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), proveniente da atmosfera e enriquecido no horizonte orgânico do solo. O resultado é uma solução de ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), ou água ácida, responsável pela carstificação epigênica. Este processo pode ser ampliado ainda pela entrada no sistema de águas alogênicas, que podem contribuir com a agressividade da água à rocha. Outro modelo importante para a evolução do relevo é a carstificação hipogênica, comumente associada a formação de ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) por hidrólise de sulfetos dispersos no maciço rochoso. Esse processo pode ainda ocorrer devido a oxidação de sulfetos, possibilitando a formação de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), altamente corrosivo (SALVATI e SASOWKY, 2002; AUDRA *et al.*, 2007; PALMER, 2011; KOLEINI *et al.*, 2013; ENNES – SILVA *et al.*, 2015).

Cavernas formadas a partir de processos epigênicos diferem das ditas hipogênicas pela direção preferencial da corrosão, que é descendente para o primeiro caso e ascendente no segundo. De forma geral, cavernas hipogênicas apresentam uma maior conectividade hidráulica, visto que os condutos carsticos são mais bem desenvolvidos, conotando uma maior permeabilidade a rocha (KLIMECHOUK 2007, 2015).

O isótopo estável do carbono ( $C^{13}$ ) consiste em uma importante ferramenta no estudo de interação entre o sistema água-rocha para aquíferos carbonáticos. À medida que a água subterrânea dissolve a rocha carbonática, seu valor isotópico ( $\delta C^{13}$ ) tende a valores mais positivos (MOOK E VERRES, 2001). Segundo Klimchouk et al. (2016) os carbonatos do Grupo Una, em Campo Formoso, possuem um valor isotópico, para  $\delta C^{13}$ , variando de aproximadamente -7 a 2.

A capacidade específica, também conhecida como vazão específica de um poço é uma relação entre vazão (Q) e a variação na carga hidráulica (s) para um determinado tempo (t). Este parâmetro, em geral, é utilizado para expressar a produtividade de um poço (TAM *et al.*, 2004; MCCOY *et al.*, 2008; YIDANA *et al.*, 2008; FARRAH *et al.*, 2013).

O sistema cárstico aqui estudado situa-se na porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (**Figura 1a**) e possui como limite norte o alto topográfico de Souto Soares, proposto por Negrão (1986). Estudos realizados nos carbonatos na região culminaram com o cadastramento de mais de uma centena de cavidades, de modo que a área, representa o local de maior densidade de galerias subterrâneas, por unidade de área, no Brasil (AULER e FERRANT, 1996).

Para além destes fatos, a região estudada é também alvo de importantes investigações científicas, principalmente aquelas relacionadas a mudanças paleoambientais (BARRETO, 2010; BICHUETTE *et al.*, 2015; LAUREANO *et al.*, 2016), e a participação de ácido sulfúrico na evolução dos condutos cársticos (VALLE, 2004). Entretanto, a compreensão de como os aspectos morfológicos estão ou não associados aos parâmetros hidrogeológicos ainda não foram explorados.

Esse trabalho tem por objetivo compreender como a evolução morfológica do sistema, na porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Brasil interage e determina a evolução hidrogeológica do aquífero, e discutir como as características hidrogeológicas atuais do aquífero ajudam na composição da história do relevo cárstico.

## 2. Área de Estudo

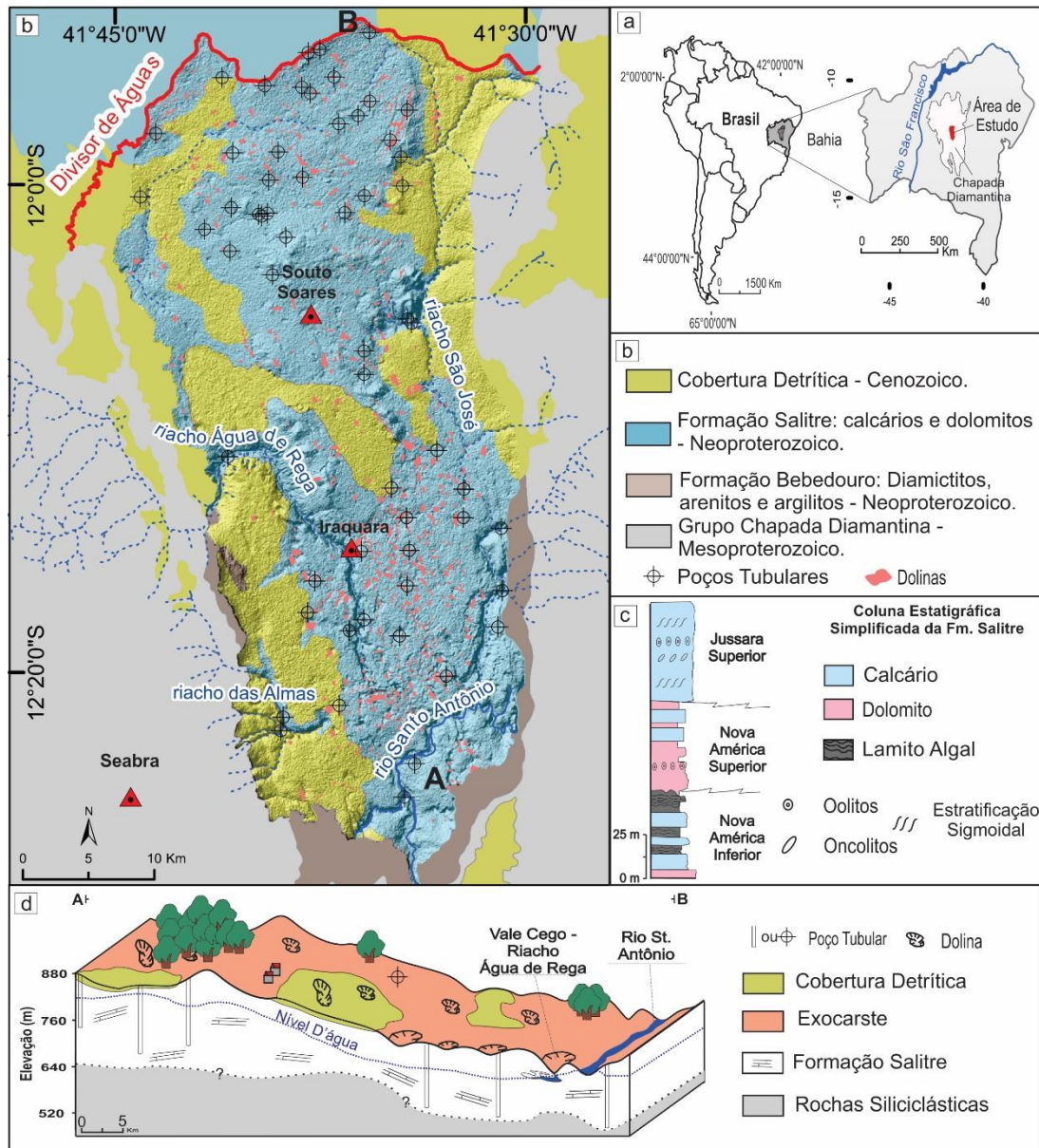
O substrato geológico da área estudada é composto de unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas, predominantemente de natureza siliciclástica representadas, da base para o topo, pelas formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu, compondo o Grupo Chapada Diamantina, e uma espessa sequência carbonático-pelítica, de idade neoproterozóica referente ao Grupo Una (Supergrupo São Francisco). Recobrimo as rochas Pré-cambrianas, afloram

coberturas detríticas cenozóicas (**Figura 1 b**) (MISI, 1979; BONFIM *et al.*, 1985; SOUZA *et al.* 1993, SOUZA *et al.* 2002, PEDREIRA, 2004).

A sequência carbonático-pelítica do Grupo Una repousa discordantemente sobre os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina e é formada da base para o topo pelas formações Bebedouro e Salitre. A Formação Bebedouro é constituída, predominantemente, por metassiltitos, metargilitos e metadiamicítitos. Já a Formação Salitre, hospedeira do aquífero cárstico, é constituída essencialmente por calcissiltitos, dolomitos e lamitos algais, fracamente ondulados na base, gradando para calcilitos, calcarenitos, dolarenitos e dololutitos oolíticos no topo (**Figura 1 c**), e na região de Iraquara compõem as unidades litoestratigráficas Jussara Superior, Nova América Superior e Nova América Inferior (SOUZA *et al.* 1993).

Associadas as rochas carbonáticas do Grupo Una são reconhecidas duas fases de deformação compressivas, sobrepostas durante o neoproterozoico. Como consequência, ocorrem amplos dobramentos com eixo N-S e lineamentos estruturais associados à falhas de empurrão com direção N-S. (GUERRA 1986; PEDREIRA *et al.*, 1987; BASTOS LEAL *et al.* 2004; RAMOS *et al.* 2007).

A recarga no sistema aquífero ocorre de duas formas distintas. A recarga autigênica é derivada unicamente da precipitação direta sobre os a área superficial do aquífero. Na outra mão, ocorre a recarga alogênica, decorrente de águas que percolam superficialmente sobre os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina e fluem em direção ao aquífero (**Figura 1 d**).



**Figura 1:** (a) Mapa de localização da área de estudo, (b) Mapa geológico simplificado (IBGE/SEI, 2013); (c) Coluna estratigráfica simplificada de Pedreira, 2004; e (d) Bloco diagrama esquemático para a área de estudo.

## 2.1 Formas do Relevo – Exocarste

Na porção meridional da Bacia de Irecê predominam feições morfológicas constituídas por rampas suavemente inclinadas e onduladas, com declividades variando entre 0 e 12%. Os vales são responsáveis pela quebra na monotonia do relevo e suas escarpas correspondem aos locais de maior declividade. Topograficamente, essa área apresenta altitudes variando entre 880 a 640 metros, onde se observa diminuição na altitude da porção Norte para Sul. As menores cotas associam-se ao vale do rio Santo Antônio, que apresenta vertentes escarpadas.

As depressões cársticas correspondem a um conjunto de dolinas ou uvalas. Estas geoformas se concentram em faixas com orientação preferencial NW – SE e, subordinadamente, N – S, ocupando 3,64% da área total, com 1,03 dolina por km<sup>2</sup>. Segundo Cruz Junior (1998), as depressões cársticas na região, podem ser classificadas em dois grupos: (i) dolinas de colapso, correspondem à depressões fechadas, com perfil escarpado; e (ii) dolinas de *suffosion* (FORD e WILLIAMS, 1989), representadas por depressões com perfis suaves, associadas a subsidência lenta causada pela remoção e infiltração de material detrítico.

### 3. Materiais e Métodos

Para realização deste trabalho foram utilizados quatro conjuntos de dados. Estes incluem dados geológicos, mapa de fenômenos cársticos, análise laboratoriais e observações de campo. A partir desses dados foram elaborados mapas litológico, de densidade de lineamentos, e de densidade de feições carsticas no software *ArcMap* 10.1. Esses métodos serão descritos sequencialmente.

#### 3.1 Dados hidrogeológicos e Análises Laboratoriais

Para o cálculo de capacidade específica foram utilizados dados hidrogeológicos de 75 poços tubulares, todos eles perfurados pela Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB). Na caracterização hidroquímica foram coletas 18 amostras de água no mês de julho de 2015. Durante essa coleta, foram medidos em campo os parâmetros: temperatura e sólidos totais dissolvidos (STD), além do posicionamento geográfico dos poços, este último utilizando-se um GPS de navegação. Ainda em campo, as amostras de água, coletadas para análise de cátions e ânions, foram filtradas em conjunto Millipore, utilizando filtros de 0,45µm e os frascos fechados foram conservados sob refrigeração, para posterior análises físico-químicas.

As análises químicas foram efetuadas no Laboratório de Estudos Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, segundo os métodos preconizados por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (CLESCERI, 1998). A determinação dos cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) e ânions ( $\text{SO}_4^-$ ) foi realizada através de cromatografia iônica, enquanto a alcalinidade ( $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ) foi obtida por titulação. Para cálculos dos índices de saturação dos minerais foi utilizado o software PHREEQC (PARKHUSRST, 1999). Esse programa de modelagem hidrogeoquímica baseia-se no equilíbrio químico das soluções aquosas com minerais e gases e possibilita a simulação de mistura de águas, trocas iônicas,



equilíbrio de soluções sob pressão ou volume constantes, dissolução e precipitação de fases minerais para alcançar o equilíbrio com a fase aquosa.

As análises de isótopos de  $\delta C13$  foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA-CPGG/IF-UFBA). Na realização das análises isotópicas, foi utilizado um sistema de espectrometria de massas contendo um espectrômetro de massas de razão isotópica-MS Finnigan MAT Delta Plus e um reator automático H-Device Thermo Quest Finnigan.

### 3.2 Confeção de mapas base

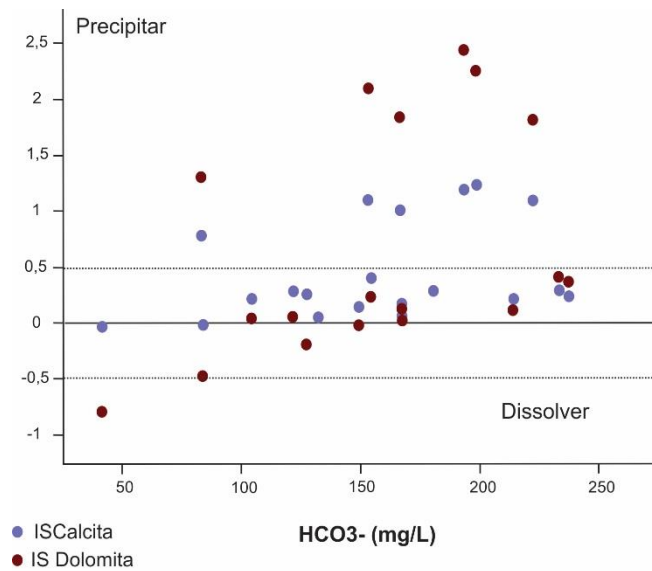
O mapa de densidade de lineamentos, foi gerado a partir da ferramenta *LineDensity* do programa ArcMap 10.1. Os lineamentos foram traçados por meio de cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens, de acordo com a interpretação de imagens de relevo sombreado geradas com base em azimutes  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ .

Com o intuito de construir um inventário cartográfico, foi elaborado um mapa de fenômenos cársticos. Esse consiste na extração de dolinas e vales cársticos, a partir da análise de fotografias aéreas na escala 1:60.000. Posteriormente, as fotografias aéreas foram escaneadas e vetorizadas no *software* ArcMap 10.1. O mapa de densidade de dolinas consiste na interpolação de pontos centrais (unidade de dolina) na ferramenta *Density* do *software* ArcMap 10.1.

Os mapas de isoconcentrações ( $\delta C13$  e  $SO_4^-$ ) foram elaborados a partir da técnica IDW (Inverso da Distância Ponderada). Essa técnica se baseia na dependência espacial, estimando um valor para um dado local não amostrado, como uma média dos valores dos dados dentro de sua vizinhança.

## 4. Resultados e Discussões

As análises físico-química e os parâmetros geoquímicos calculados estão demonstrados na **Tabela 1**. Águas tendem a precipitar calcita ( $CaCO_3$ ) e dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) quando saturadas nesses componentes, e dissolvê-los quando insaturadas. O índice de saturação (IS) é o parâmetro mais utilizado para quantificar a saturação de fases minerais na água subterrânea. O resultado no cálculo dos IS demonstrou que as águas em estudo se apresentam saturadas, ou parcialmente saturadas em calcita e dolomita (**Figura 2**). O índice de saturação para a calcita variou de -0,01 a 1,24. Já o índice de saturação em dolomita variou ente -0,48 e 2,44, sugerindo que essas águas apresentam pouca agressividade para dissolver essas fases minerais presentes na rocha.



**Figura 2:** Índice de saturação (Is) em calcita e dolomita versus o bicarbonato para as amostras analisadas. Ressalta-se a baixa capacidade em dissolver calcita e dolomita da água. Os valores entre -0,5 e 0,5 consistem na faixa de segurança proposta por Deutsch (1997).

O principal processo de dissolução da rocha, na área de estudo, é um tema ainda bastante controverso. Segundo Palmer (2011), quando o ácido carbônico é o principal responsável pela dissolução da rocha, o índice de saturação mineral (IS), apresentará uma dependência em função da pressão parcial de CO<sub>2</sub> (PCO<sub>2</sub>), da temperatura e dos sólidos totais dissolvidos (STD). A **Tabela 2** representa uma matriz de correlação de Spearman, para dados não paramétricos, entre o IS em calcita, IS em dolomita, temperatura, Pco<sub>2</sub> e STD. A não dependência entre os elementos, evidenciada pelos baixos coeficientes de correlação entre eles, sugeriu que o processo de dissolução da rocha por ácido carbônico não é dominante no sistema. Sendo assim, outro processo seria necessário para explicar a evolução morfológica do relevo.

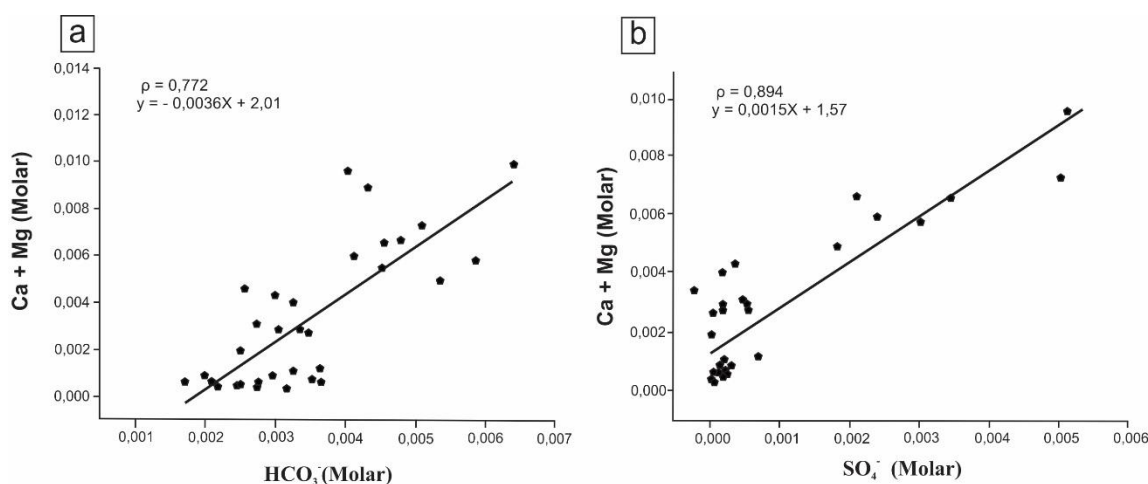
**Tabela 1:** Dados hidroquímicos, físico-químicos e parâmetros calculados para área de estudo, coletados em julho de 2015.

Amostra	Descrição	T (°C)	STD (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	IS <sub>Cal</sub>	IS <sub>Dol</sub>	IS <sub>Gip</sub>	P <sub>CO<sub>2</sub></sub> (Pa)
L1- 01	Afloramento do Nível Estático	20,21	142	83,5	1,9	2,9	12,3	-0,01	-0,48	-3,84	0,49
L1- 02	Poço Tubular	24,17	592	214	17,6	34,1	14,4	0,22	0,12	-2,57	0,28
L1- 03	Poço Tubular	26,23	287	193	4,6	14	9,2	1,2	2,44	-3,58	1,60
L1- 04	Nascente	24	747	127	4,6	38,7	5,3	0,26	-0,19	-3,09	0,20
L1- 05	Afloramento do Nível Estático	21,6	910	121	28,7	48,4	10,3	0,29	0,05	-2,23	0,15
L1- 06	Poço Tubular	24,49	752	104	9	33,2	8,6	0,22	0,04	-2,85	0,34
L1- 07	Poço Tubular	24,31	428	222	22,1	31,6	10,9	1,1	1,82	-2,52	0,39
L1- 08	Poço Tubular	26,66	1590	237	41,8	59,9	38,4	0,25	0,38	-2,12	0,20
L1- 09	Afloramento do Nível Estático	23,29	473	153	17,9	22,6	12,4	1,1	2,1	-2,74	0,61
L1- 10	Poço Tubular	24,81	535	149	5,2	24,6	8,8	0,15	-0,02	-3,14	0,19
L1- 11	Nascente	25,78	394	167	5	19,6	11,1	0,09	0,04	-3,30	0,19
L1- 12	Poço Tubular	25,44	427	166	3,9	20,2	9,2	1,01	1,84	-3,43	0,54
L1- 13	Poço Tubular	25,15	1810	82,8	202	131,8	38,4	0,79	1,3	-1,19	0,35
L1- 14	Poço Tubular	24,45	829	198	19,6	49,9	21,6	1,24	2,25	-2,42	0,28
L1- 15	Poço Tubular	25,33	699	180	13,7	45,4	13,7	0,29	0,17	-2,57	0,11
L1- 16	Poço Tubular	24,71	1160	233	19,9	67,2	35,9	0,3	0,42	-2,35	0,23
L1- 17	Poço Tubular	23,54	309	132	2	16,9	10,8	0,05	0,03	-3,74	0,22
L1- 18	Afloramento do Nível Estático	25,29	455	167	10,3	26,4	11,4	0,17	0,09	-2,87	0,16

**Tabela 2:** Matriz de correlação de Spearman entre o índice de saturação em calcita, dolomita, STG, temperatura e PCO<sub>2</sub>, exemplificados na tabela 1.

Matriz de Corelação	Is - Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	Is - Dolomita (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	STD (g/L)	Temp. (°C)	PCO <sub>2</sub> (Pa)
Is - Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	1,0				
Is - Dolomita (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	0,9	1,0			
STD (g/L)	0,2	0,1	1,0		
Temperatura (°C)	0,0	0,3	0,0	1,0	
PCO <sub>2</sub> (Pa)	0,5	0,5	-0,4	-0,1	1,0

O bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é o principal ânion formado pelo processo de dissolução epigênico. Por outro lado, terrenos cársticos formados por processos hipogênicos tendem a liberar tanto o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> quanto o sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) (AULLER e SMART, 2003). A evolução do processo de dissolução da rocha libera, como principais cátions, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> na água. Uma correlação entre a Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e bicarbonato, demonstrou um coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) na ordem de 0,772 (**Figura 3a**). Em contrapartida, uma correlação entre a Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> em função do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, demonstrou r<sup>2</sup> na grandeza 0,894 (**Figura 3b**).

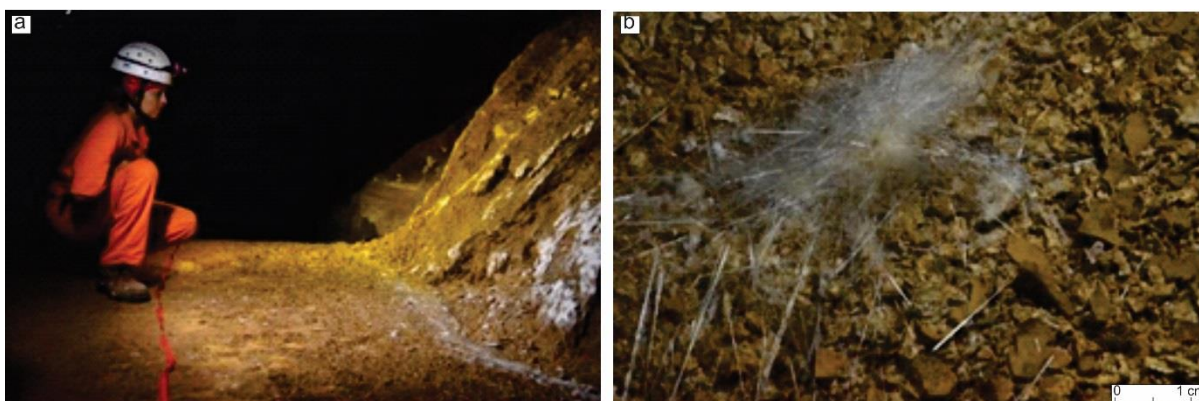
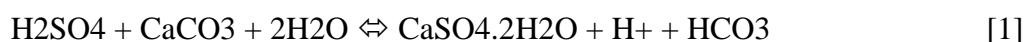


**Figura 3:** Correlação entre Dureza (Ca + Mg) em função do bicarbonato (a) e do sulfato livre (b). Para a confecção dos gráficos foram utilizados resultados de análise de amostras coletadas nessa pesquisa e análises de amostras cedidas pela Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia – CERB.

Sendo a dissolução da rocha carbonática exclusivamente controlada pela adição de ácido carbônico no sistema, a correlação 3a deveria apresentar um coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) maior, quando comparado a 3b, entretanto, foi observado um elevado coeficiente de correlação em 3b. Isso indica que o processo de dissolução hipogênico tem papel importante na evolução do sistema cárstico, assim como observado por Auler e Smart (2003) no Carste de Campo Formoso e Valle (2004) nas bacias de Irecê e Una-Utinga.

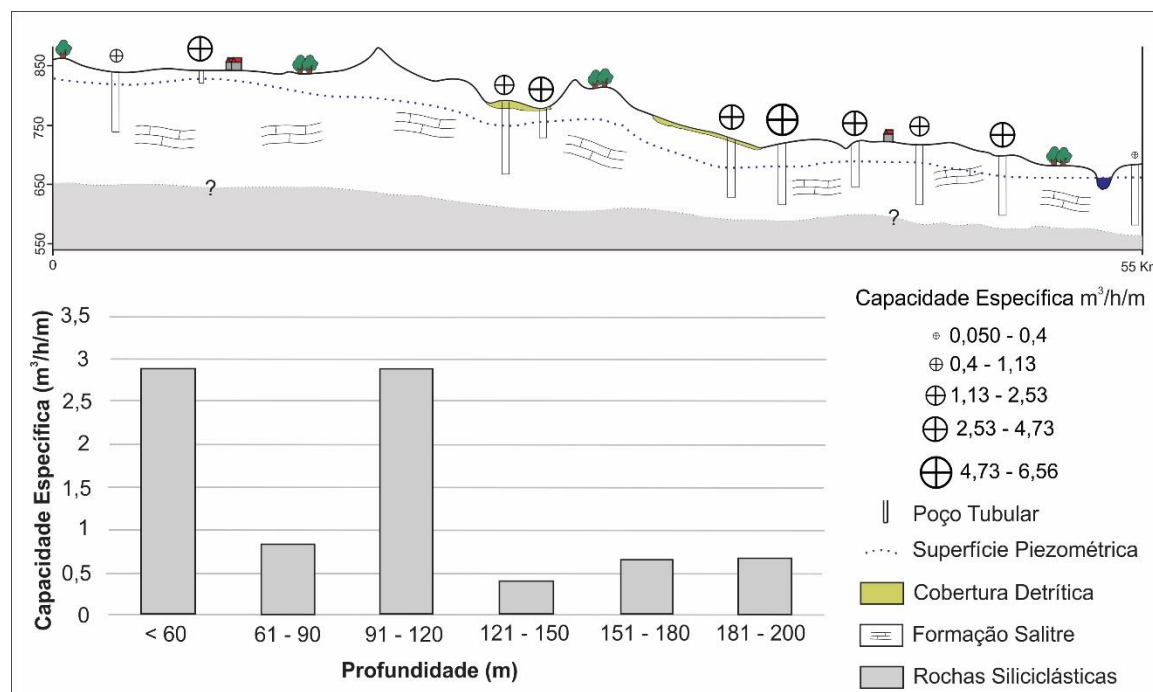
Aqui, atribui-se a dissolução hipogênica ao ácido sulfídrico, formado a partir da hidrólise de sulfetos disseminados na rocha. O principal subproduto do processo de dissolução

hipogênico (**Equação 1**) é a Gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Esse mineral apresentou índices de saturação variando entre -1,19 a -4,03, valores consideráveis quando comparados com o IScal e o ISdol. Outro fator, que corrobora com a importância da carstificação hipogênica no sistema, é a presença de agulha de gipsita, formadas a partir da supersaturação em água, encontradas na caverna da Torrinha (**Figura 4**).



**Figura 4:** Agulhas de Gipsita, formadas devido evaporação da água e consequente precipitação do mineral. Em (a) vista geral do local mineralizado na Gruta da Torrinha; (b) detalhe para a Gipsita acicular.

A **Figura 5** ilustra a distribuição de intervalos de classes da profundidade dos poços tubulares na região, em função da capacidade específica ( $S_c$ ) ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ), utilizando a tendência central ou mediana para classificação quanto a  $S_c$ . A  $S_c$  atinge os maiores valores nos intervalos entre 91 e 120 metros e menor que 60 metros, sugerindo uma maior conexão hidráulica nesses intervalos de classe. Uma maior conectividade em zonas de distintas, sugere, que carstificação ocorreu pela coalescência de processos de dissolução. A carstificação hipogênica é dominante no sistema e, possivelmente, foi responsável pelos elevados valores de  $S_c$  na zona mais profunda (entre 91 e 120). Entretanto o processo de dissolução epigênico também exerce importante papel na carstificação e formação do modelado, sendo, o responsável pela elevada conectividade na zona mais rasa do aquífero. Segundo Laureano et al. (2016) existiu pelo menos dois milhões de anos de evolução epigênica do relevo na área de estudo, que podem ter mascarado possíveis feições morfológicas hipogênicas.

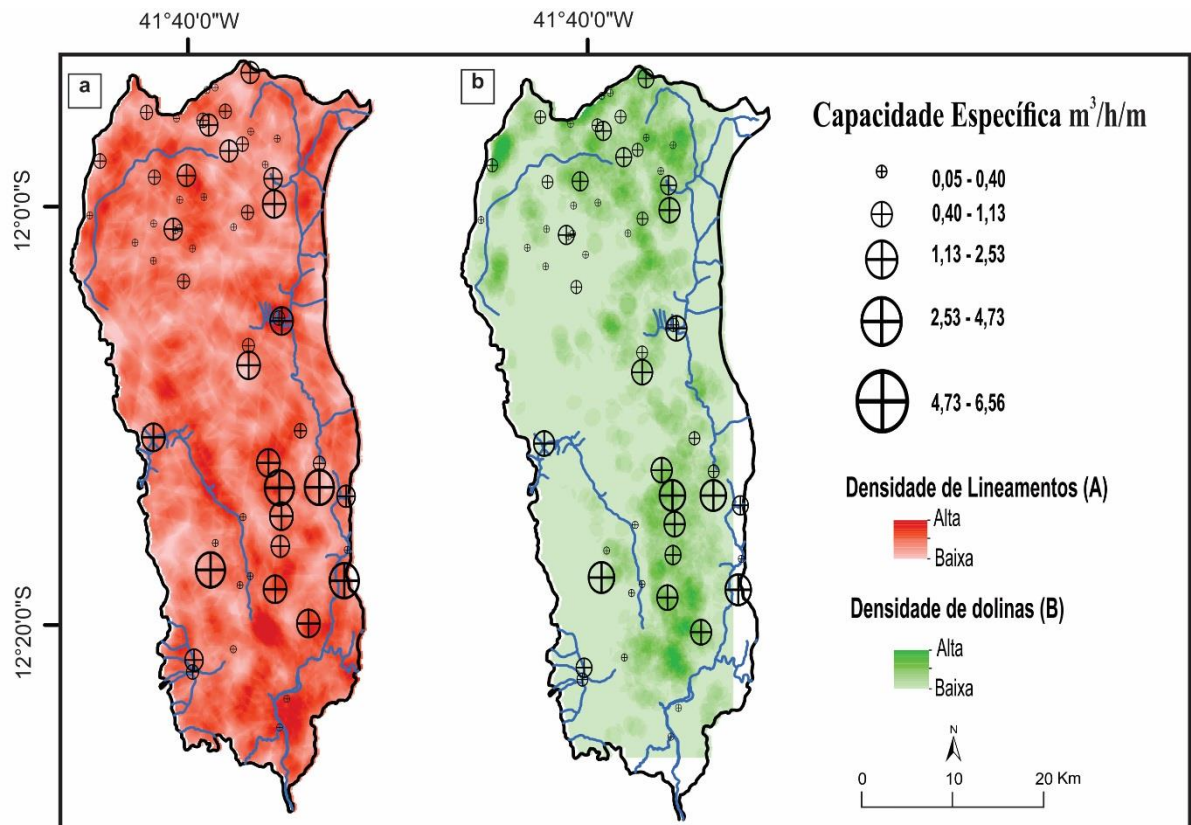


**Figura 5:** Distribuição de intervalos de classes em relação a profundidade, em função da capacidade específica ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ) de poços tubulares, na região. Seção hidrogeológica referente ao bloco diagrama esquemático da área de estudo (**Figura 1d**).

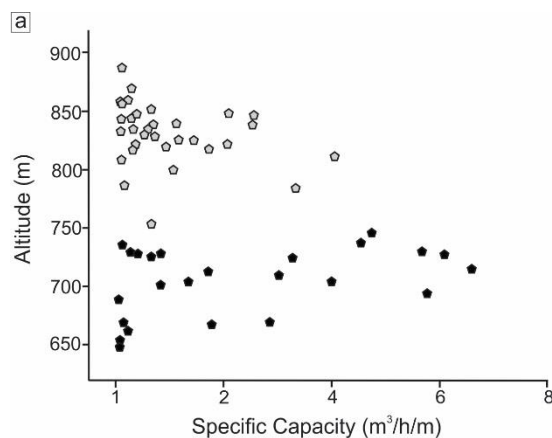
A porosidade terciária (WHITE, 1999; WHITE, 2002) em rochas carbonáticas está relacionada ao desenvolvimento do relevo cárstico. Daí, faz-se necessário compreender a interação entre o arranjo geométrico superficial e o carste subterrâneo – endocarste. A Figura 6 demonstra uma relação entre a densidade de lineamentos (**Figura 6a**), a quantidade de dolinas por área ou índice de dolineamento (**Figura 6b**), em função da capacidade específica ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ ) de poços tubulares. Com isso, observou-se que a coalescência de lineamentos pouco interfere nos dados de capacidade específica de poços tubulares na região. Entretanto, a densidade de dolinas exerceu uma moderada influência sobre os dados de  $Sc$ .

Percebeu-se ainda uma relação entre a altitude e dados de capacidade específica. Apesar, de não existir uma correção linear direta entre esses dados, de maneira geral, poços instalados em altitudes menores apresentam maiores valores de capacidade específica (**Figura 7**). A porção topograficamente mais rebaixada, coincide com as principais áreas de descarga autigênia dos riachos Água de Rega, das Almas e São José. Devido a isso, ocorreu uma grande inserção de águas com elevada agressividade (águas ricas em ácido húmico e carbônico) no sistema, culminando num aumento da porosidade terciária, e conseqüente maior permeabilidade da rocha. O sumário estatístico, exemplificado na **Figura 7**, conotou um maior desvio padrão para os dados de  $SC$  de poços tubulares perfurados em baixas altitudes. Devido a isso, sugere-

se, que carstificação nessa porção ocorreu de forma mais heterogênea quanto comparada à altitudes topograficamente mais elevadas, onde ocorreram baixas descargas alogênicas.



**Figura 6:** Capacidade Específica (m³/h/m) em função: da densidade de lineamentos (a); e índice de dolineamento ou unidade de dolina (b).



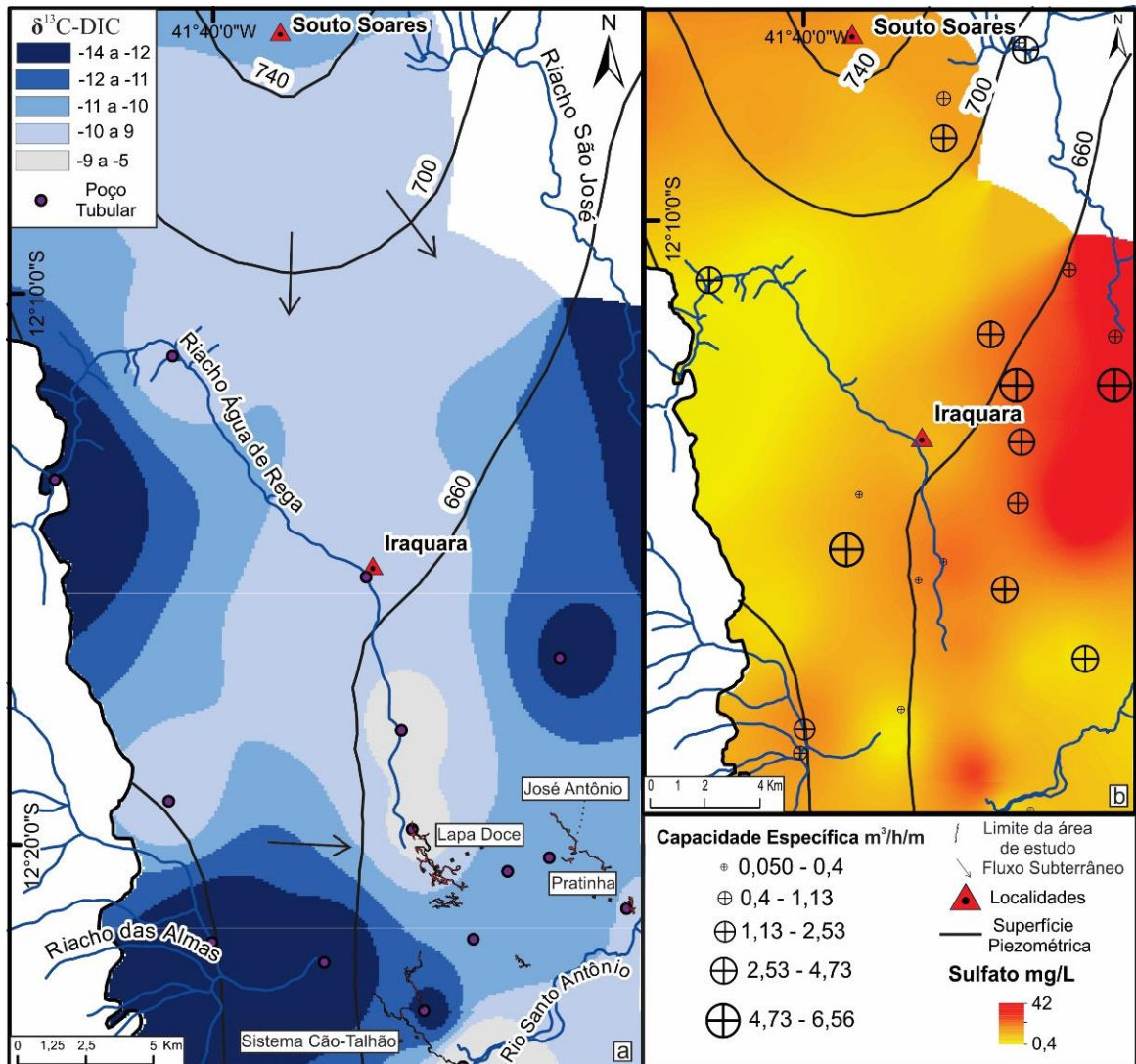
	SC (620 - 750 m)	SC (750-900 m)
<b>Média</b>	2,349	0,934
<b>Mediana</b>	1,700	0,590
<b>Desvio Padrão</b>	2,236	1,020
<b>Mínimo</b>	0,060	0,050
<b>Máximo</b>	6,560	4,020
<b>Contagem</b>	44	32

**Figura 7:** Comparação entre altitude (m) e a capacidade específica de poços tubulares (m³/h/m) para os poços na região. Em cinza poços instalados em altitude variando entre 751 e 900 metros; em preto poços instalados em altitude variando de 653 a 750 metros.

As linhas de isótopos de  $\delta^{13}\text{C}$  em escala regional (**Figura 8a**), exibiu o rio Santo Antônio como principal área de descarga para o sistema aquífero em estudo. As águas nessa zona possuem valores menos depletados de  $\delta^{13}\text{C}$ , devido ao maior tempo de residência e consequente dissolução da rocha. Todavia, o fluxo subterrâneo pode ter pouca, ou nenhuma, continuidade lateral, sendo limitado preferencialmente em três zonas: (i) Sistema riacho das Almas – Cão - Talhão; (ii) Sistema riacho Água de Rega – Lapa Doce; e (iii) Sistema riacho São José – Gruta José Antônio - Pratinha. Essa interpretação baseou-se no padrão de dispersão e evolução dos isótopos do isótopo estável do carbono, que apresentou valores mais depletados em zonas de recarga distintas, evoluindo de forma desigual, para teores mais positivos em zonas de descarga distintas.

A distribuição espacial do sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) (**Figura 8b**) demonstrou um aumento na isoconcentração desse elemento de Oeste para Leste. Evidenciando, de maneira geral, poços com maior capacidade específica sobre o domínio de elevada concentração de  $\text{SO}_4^-$ , corroborando com a importância da dissolução hipogênica no modelado. As áreas de elevada concentração de sulfato coincidem ainda com o sistema, aqui defendido, como riacho São José – Gruta José Antônio – Pratinha, principal exutório do sistema hídrico subterrâneo, com vazão média, avaliada no período entre julho/02 e setembro/03 (VALLE, 2004), na ordem de 0,821  $\text{m}^3/\text{s}$ .





**Figura 8:** (a) Linhas de isotores de  $\delta^{13}\text{C-DIC}$  para a água subterrânea da porção Sul da Bacia de Irecê, coletadas em julho de 2015. As isolinhas demonstram como principal exutório subterrâneo o rio Sto. Antônio, localizado na região SE da área de estudo; em (b) isotores de sulfato (mg/L), apresentando aumento na concentração de W para E. Os mapas topográficos de cavernas correspondem aos mapas da Lapa Doce, Gruta da Torrinha, Lapa do Diva, Sistema Cão-Talhão, Gruta da Pratinha, Gruta José Antônio e Gruta Pau dalho, cedidos pelo Grupo Bambuí de Espeleologia.

## 5. Considerações finais

A dissolução da rocha carbonática, na porção meridional do Platô de Irecê, é provavelmente proveniente da coalescência de dois processos de carstificação. O primeiro refere-se à carstificação epigênica, que tende a acentuar-se até a profundidade de 60 m, levando em consideração os dados de capacidade específica em poços tubulares. Esse processo, possivelmente, é responsável por uma maior conectividade hidráulica no intervalo de classe de poços tubulares até a profundidade supracitada. Entretanto, os dados aqui analisados indicam valores mais elevados de capacidade específica no intervalo de classes de profundidades entre 91 e 120 m, sugerindo a formação de cavidades na zona saturada do aquífero. Essa maior

conectividade hidráulica nesse intervalo de classe pode estar associada a uma carstificação hipogênica, causada pela hidrólise de sulfetos disseminados na rocha.

Quando correlacionado as feições superficiais do terreno, os dados de capacidade específica em poços tubulares, apresentaram respostas distintas em relação a densidade de lineamentos e de dolinas. Observa-se uma baixa correlação dos dados de Sc em função do mapa de densidade de lineamentos. Por outro lado, a densidade de dolinas apresenta moderada influência nos valores de Sc. Assim, é possível constatar que o arranjo geométrico superficial interfere de forma significativa na capacidade específica de poços tubulares, quando levado em consideração a dispersão de dolinas.

De maneira geral, a superfície piezométrica acompanha a topografia do terreno, no sentido do rio Santo Antônio – principal sistema exutório subterrâneo. Entretanto, o fluxo subterrâneo pode ter pouca continuidade lateral, sendo limitado preferencialmente em três sistemas cársticos distintos, a saber: (i) Sistema riacho das Almas – Cão - Talhão; (ii) Sistema riacho Água de Rega – Lapa Doce; e (iii) Sistema riacho São José – Gruta José Antônio - Pratinha.

A compreensão dos fatores morfológicos que condicionam a evolução hidrogeológica é uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneo em modelados carsticos. Nesse trabalho são reconhecidas duas zonas de maior produtividade no aquífero: (i) até 60 metros de profundidade; e (ii) em profundidade variando entre 91 – 120 metros. Outro fator importante a destacar é que poços perfurados em baixas altitudes tendem a ser mais produtivos que poços perfurados em locais mais elevados.

A evolução de um sistema cárstico é intrínseco a combinação de diversos fatores, como: clima, tectônica, litologia, abrasão e processo de dissolução. O estudo geométrico superficial é um dos principais recursos para o entendimento do sistema hidrogeológico.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. Ao Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas pelos mapas de cavernas cedidos para a realização dessa pesquisa. À Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia. Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – NEHMA e seus participantes. Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento das pesquisas.

## Referências

- AUDRA F.; HOBLEA, F., BIGOT, J; e NOBECOURT, J. The role of condensation-corrosion in thermal speleogenesis study of a hypogenic sulfidic cave in aux – lee – baïans, France. *Acta carsologica*, n 36/2, p. 185–194, 2007.
- AULER, A. S.; FARRANT, A.R. A brief introduction to karst and caves in Brazil. *Univer. Britl Speloca. Soc.* n 20, p. 187-200. 1996.
- AULER, A. S.; SMART, P. L. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid northeastern Brasil. *Erath Surface Processes and Landforms.* n 28, p. 157-168. 2003.
- BARRETO E. A. S. Reconstituição da pluviosidade da Chapada Diamantina (BA) durante o quaternário tardio através de registros isotópicos (O e C) em estalagmites. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP. 2010.
- BASTOS-LEAL L.R., LIMA O.A.L., LUZ J. A.G., RIBEIRO S.H.S.; SILVA A.B. Caracterização hidrogeológica da bacia do rio Salitre, região centro-norte do estado da Bahia. In: Encontro Brasileiro de Estudo do Carste, Belo Horizonte, Anais, v.1, p. 60-60. 2004.
- BICHUETTE M. E.; RANTIN B., HINGST-ZAHER E.; TRAJANO E. Geometric morphometrics throws light on evolution of the subterranean catfish *Rhamdiopsis krugi* (Teleostei: Siluriformes: Heptapteridae) in eastern Brazil. *Biological Journal of the Linnean Society.* n 114, p. 136-151. 2015.
- BOMFIM L. F. C., ROCHA A. J. D., PEDREIRA A. J., MORAIS FILHO J. C., GUIMARÃES J. T., TESCH N. A. Projeto Bacia de Irecê. Relatório final. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM. 1985.
- EGEMINER S. J. Caverns development by thermal water. *National Speleological Society Bulletin.* 1981.
- CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E.; EATON, A. D. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Washington. N 20, p. 1325, 1998.
- CRUZ JUNIOR. Aspectos geomorfológicos e geoespeleologia do carste da região de Iraquara, Centro-Norte da Chapada Diamantina, Estado de Bahia. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 1998.
- ENNES-SILVA, R. A.; BEZERRA F.H.R.; NOGUEIRA F. C.C.; KLIMCHOUK F. B.; CAZARIN A.C. L., AULER A. S. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. *Tectonophysics*, n 666, p. 244–259. 2015.

- FARRAH N. Al; CAMP M. V.; Walraevens Kristine. Deducing transmissivity from specific capacity in the heterogeneous upper aquifer system of Jifarah Plain, NW-Libya. *Journal of African Earth Sciences*, n 85, p. 12–21. 2013.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst geomorphology and hydrology*. London, Unwin Hyman, 320 p. 1989.
- FORD, D.C., WILLIAMS, P.W. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Geography. Second Edition, p. 562. 2007.
- GUERRA; A. M. *Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Bahia*. Tese de Doutorado. Programa de Geologia de Aplicação – USP. 1986.
- IBGE/SEI. *Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia*. Escala 1:100.000. 2013.
- KLIMECHOUK, A.B. *Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective*. National Cave and Karst Research Institute Special Paper #1, Carlsbad. 2007.
- KLIMECHOUK A.; AULER, A. S.; BEZERRA, F.H.R.; CAZARIM, C. L.; BALSAMO, F.; BUBYANSKY Y. *Hipogenic Origim and Geologic Controls and Fractional Organization of a Giant Cave System im Precambrian Carbonates, Brasil*. *Geomorphology*, volume 253, p. 358 – 405. 2016.
- KOLEINI M., ROOY J. L. V., BUMBY A.; *Hypogenic Karstification and Conduit System Controlling by Tectonic Pattern in Foundation Rocks of the Salman Farsi Dam in South-Western Iran*. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:7, No:5, 2013.
- LAUREANO, F. V. *O Registro Sedimentar Clástico Associado aos Sistemas de Cavernas Lapa Doce e Torrinha, Município de Iraquara, Chapada Diamantina*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP. 1998.
- LAUREANO, F. V.; KARMANN I., GRANGER D. E.; AULER, A. S.; ALMEIDA R. P.; CRUZ F. W.; STRÍCKS N. M.; NOVELLO V. F. *Two million years of river and cave aggradation in NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution*. *Geomorphology*, n 273: p. 63–77. 2016.
- MCCOY K. J.; KOZAR M. D. *Use of sinkhole and specific capacity distributions to assess vertical gradients in a karst aquifer*. *Environmental Geology*, n 54, p. 921–935. 2008.
- MISI, A. *Grupo Bambuí no Estado da Bahia*. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1, 119-154, 1979.
- MOOK, W. G. e VRIES, J. J. *International Agency of Atomic Energy*. Vol. 1. 2001.

- NEGRÃO, F. I. Caracterização Hidrogeoquímica e vulnerabilidade do Sistema Cárstico da Região de Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 1986.
- PALMER, A.N. Distinction Between Epigenic and Hypogenic maze Caves. *Geomorphology*, n 134, p. 9–22. 2011.
- PARKURST, D. L., APPELO, C. A. J. User guide to PHREEQC (version 2) – A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Water Resources Investigations Report, Denver, Colorado, p 95-4259. 1999.
- PEDREIRA A.J. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo. 2004.
- PEDREIRA A.J., ROCHA A.J.D., COSTA I.V.G., MORAES FILHO, J.C. Projeto Bacia de Irecê II. Relatório final. Salvador: CPRM. 1987.
- RAMOS S. O.; ARAÚJO H. A.; BASTOS LEAL L. R.; LUZ J. A. G.; DUTTON A. R. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semi-árido. *Revista Brasileira de Geociências*, n 34, p. 227-233. 2007.
- SALVATI, R; SASOWKY, I. D. Development of Colapse Sinkholes in Áreas Of Graundwater Discharge. *Journal of Hidrology*, n 264, p. 1-11. 2002.
- SOUZA S.L., TOLEDO L.A.A., BRITO P.C.R., FRÓES R.J.B.; SILVA R.W.S. Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Textos, v. 1, 110 p. 2002.
- SOUZA, S. L., BRITO, P. C. R., SILVA, R. W. S. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM. 1993.
- TAM V. T.; SMEDT F. de; BATELAAN O.; Dassargues A. Study on the relationship between lineaments and borehole specific capacity in a fractured and karstified limestone area in Vietnam, v 12, p. 662–673. *Hydrogeology Journal*. 2004.
- VALLE, M. A. Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias De Irecê E Salitre): um Exemplo da Ação de Ácido Sulfúrico no Sistema Cárstico. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2004.

WHITE, W. B.; WHITE, E. L. Ground Water Flux Distribution Between Matrix, Fractures, And Conduits: Constraints On Modeling. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers. The virtual scientific journal. 2005.

WHITE, W.B. Groundwater Flow In Karstic Aquifers. The Handbook of Groundwater Engineering, cap.8, p. 18-36. 1999.

WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. Engineering Geology, n 65, p. 85-105. 2002.

YIDANA S. M.; OPHORI D.; BANOENG-YAKUBO B. Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. Environmental Geology, v 56. P. 1213–1223. 2008.

## CAPÍTULO 4

### **ARTIGO 2 – Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ ) Aplicadas no Entendimento do Processo de Salinização da água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidencia do Semiárido do Nordeste Brasileiro.**

---

#### **Resumo**

A água subterrânea, particularmente em regiões áridas e semiáridas é, em muitos casos, a única fonte disponível de abastecimento hídrico para a população. O declínio ou deterioração na qualidade da água é considerado um problema crucial para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Nesse trabalho, foi realizada uma investigação hidrogeológica utilizando dados geoquímicos e isotópicos no aquífero cárstico, instalado nas rochas carbonáticas proterozoicas da Formação Salitre: porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Com isso, pretende-se compreender os processos hidrogeoquímicos e físicos que contribuem para a salinização da água subterrânea. Esse entendimento é essencial na exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Os processos de evaporação e lixiviação mostraram-se pouco eficientes na reconcentração de sais minerais na zona vadosa do aquífero. A modelagem hidrogeoquímica e isotópica demonstraram que a composição da água subterrânea na região, está sujeita a processos geológicos, decorrentes da interação água rocha, e de atividades antrópicas recentes, como despejo indevido de lixo e esgoto. O uso integrado da geoquímica e de isotópicos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), em aquíferos cársticos em rochas carbonáticas proterozoicas, mostrou-se como importante instrumento na modelagem e entendimento dos processos de salinização da água subterrânea. Evidenciando ser uma importante ferramenta na avaliação e gestão dos recursos hídricos.

Palavras chave: salinização da água subterrânea, água subterrânea, aquífero carbonático.

#### **1. Introdução**

A salinização das águas subterrâneas tornou-se um dos principais problemas de gestão e utilização dos recursos hídricos subterrâneos no mundo (UNESCO, 2004). Sua composição química está sujeita a diversas transformações, induzidas por processos hidrológicos, geoquímicos e biológicos. Tais processos são, por sua vez, dependentes da composição mineralógica da rocha, do tempo de residência da água, do fluxo subterrâneo e de condições

climáticas (Falcone *et al.*, 2008; Sánchez *et al.* 2015). No caso dos aquíferos carbonáticos é necessário levar em consideração sua evolução morfológica, que conotará aspectos hidrogeológicos específicos a cada região (Ford e Williams, 2007).

Na maioria dos países a água subterrânea é utilizada para o abastecimento doméstico de pequenas cidades, principalmente em regiões rurais. A deterioração na qualidade da água pode acarretar em consequências negativas para a atividade civil, agrícola e industrial. Sendo assim, compreender a origem e os mecanismos do processo de salinização torna-se uma prática fundamental para a prevenção e manejo do recurso hídrico subterrâneo (Monjerezi *et al.*, 2011; Ettayfi *et al.*, 2012; Ghiglieri *et al.*, 2012; Zhang *et al.* 2015).

A salinização da água subterrânea pode ocorrer por diversos processos naturais e antrópicos: (i) intrusão da cunha salina; (ii) interação com águas antigas; (iii) dissolução de evaporitos; (iv) evaporação de água doce, principalmente em lagos; (v) dissolução da rocha, normalmente associada a aquíferos fissurais e carbonáticos; (vi) concentração e lixiviação de sais da água da chuva na zona vadosa do aquífero; e por fim (vii) associada a extensa irrigação e uso de fertilizantes. Os processos de salinização da água subterrânea não são excludentes, podendo ocorrer pela coalescência de fatores (Kim *et al.* 2003; Moller *et al.* 2008; Montety *et al.* 2008; Bouchaou *et al.* 2008; Carol *et al.* 2009; Gattacceca *et al.* 2009; Rosenthal *et al.* 2009; Schiavo *et al.* 2009; Hamouda *et al.* 2011; Moussa *et al.* 2011; Monjerezi *et al.* 2011; Vinson *et al.* 2011; Wang e Jiao 2012; Currell *et al.* 2013; Pauwels *et al.* 2013; Rina *et al.* 2013; Stoecker *et al.* 2013; Carreira *et al.* 2014; Madioune *et al.* 2014; Alvarez *et al.* 2015; Cary *et al.* 2015; Kumar *et al.* 2015; Zhang *et al.* 2015).

Entre os diferentes tipos de abordagens, os métodos hidroquímicos auxiliados pelo estudo isotópico consistem em um importante mecanismo na compreensão e identificação das possíveis fontes de salinização e renovação das águas subterrâneas. Assinaturas isotópicas distintas podem sugerir diferentes episódios de recarga, a partir de diferentes fontes (autigênica ou alogênica), ou ainda mistura entre águas de sistemas aquíferos diferentes. (Kin *et al.*, 2003; Carol *et al.*, 2009; Moussa *et al.* 2001; Vison *et al.*, 2011; Currell *et al.* 2013; Rina *et al.*, 2013; Shiavo *et al.*, 2013; Carreira *et al.*, 2014; Han *et al.* 2014; Alvarez *et al.*, 2015).

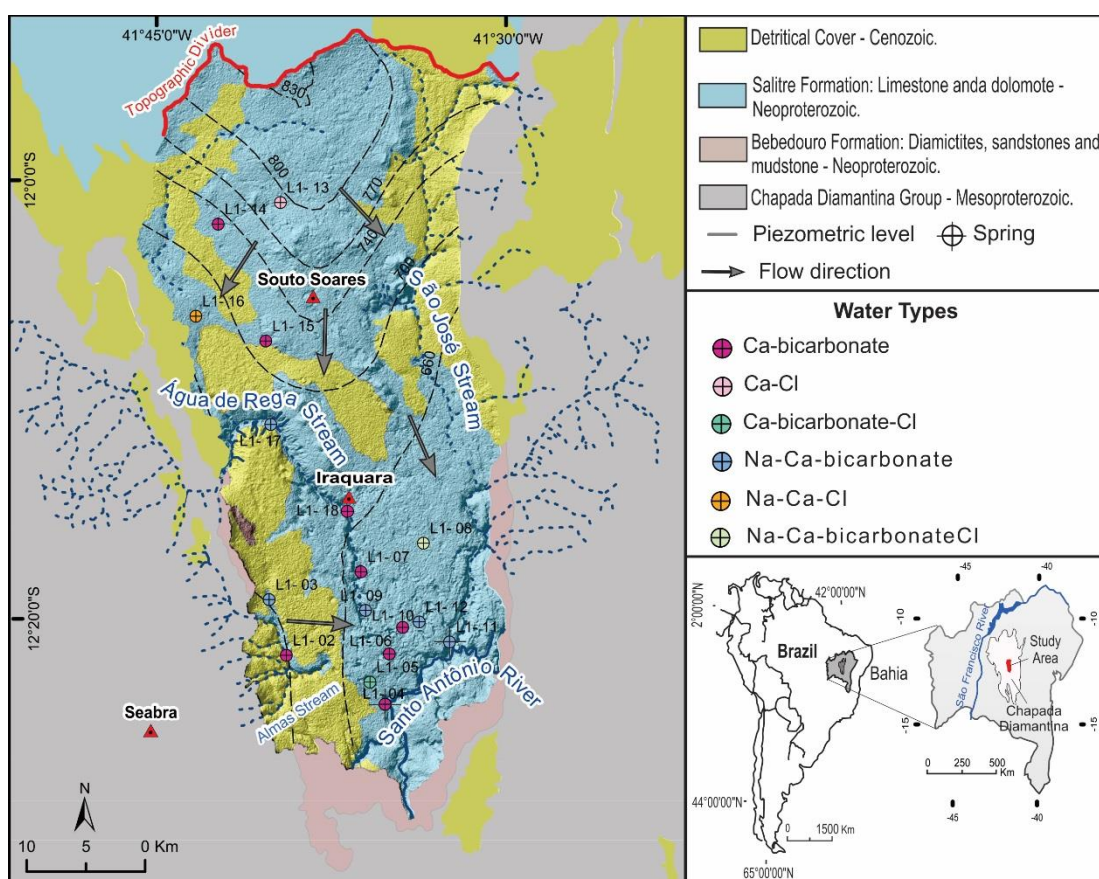
A porção meridional da Bacia de Irecê é palco de importantes descobertas científicas, principalmente aquelas relacionadas a mudanças paleoambientais (Barreto, 2010; Bichuette *et al.*, 2015; Laureano *et al.*, 2016), e caracterizações hidrogeológicas de caráter regional (Guerra, 1986; Valle, 2004). Entretanto, a compreensão da hidrogeologia local e dos processos de salinização atuantes consistem em uma importante lacuna do conhecimento atual, dificultando uma boa gestão dos recursos hídricos.



O presente trabalho discute a avaliação de múltiplas ferramentas hidroquímicas e isotópicas, visando uma melhor compreensão dos processos hidrogeoquímicos e físicos que contribuem para a salinização da água subterrânea. Esse entendimento é essencial na exploração sustentável do recurso hídrico subterrâneo em regiões áridas e semi-áridas, onde esse recurso é bastante limitado.

## 2. Descrição da Área

A área de estudo está localizada na porção meridional da Bacia de Irecê, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil (**Figura 1**). No que diz respeito a geologia, aflora uma espessa sequência carbonático-pelítica neoproterozoica, correspondente à formação Salitre, depositada de maneira discordante sobre unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas, de natureza, predominantemente, siliciclásticas que compõem o Grupo Chapada Diamantina. Entre estas unidades ocorre uma camada descontínua de diamictitos glaciais da formação Bebedouro, que é sotoposta à formação Salitre e juntas integram o Grupo Una. Recobrimo estes pacotes são mapeadas coberturas detrítico-lateríticas cenozoicas (**Figura 1**) (Misi 1979; Bonfim *et al.*, 1985; Souza *et al.* 1993, Souza *et al.* 2002, Pedreira, 2004).



**Figura 1:** Localização da área de estudo e mapa geológico simplificado (IBGE/SEI, 2013), com os pontos de análise e a classificação da água subterrânea.

A Formação Bebedouro, supramencionada, é constituída, predominantemente, por metassiltitos, metargilitos e metadiamicritos. Já a Formação Salitre, hospedeira do aquífero carbonático, é constituída, predominantemente, por calcissiltitos, dolomitos e lamitos algais fracamente ondulados na base, gradando para calcilutitos, calcarenitos, dolarenitos e dololutitos oolíticos no topo, e na região de Iraquara compõem as unidades litoestratigráficas Jussara Superior, Nova América Superior e Nova América Inferior (Souza et al. 1993) (**Figura 2a**).

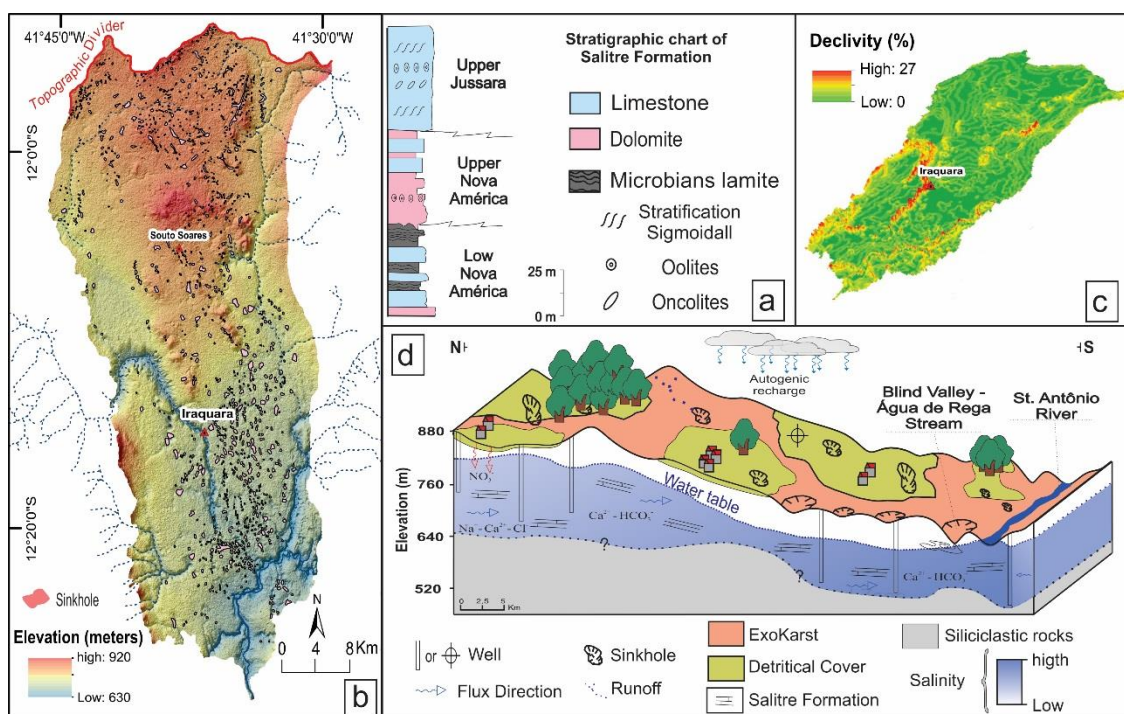
Morfologicamente, a região apresenta altitudes variando entre 880 e 640 metros, com atenuação na topografia de Norte para Sul (Figura 2b). Seu relevo é caracterizado por rampas suavemente inclinadas e onduladas com declividades variando entre 0 e 12% (Figura 2c). Os vales fluviais são responsáveis pela quebra na monotonia do relevo e suas escarpas correspondem aos locais de maior declividade. As depressões cársticas correspondem à dolinas ou uvalas, normalmente com formatos arredondados a ovalados. Concentram-se em faixas com orientação preferencial NW – SE e subordinadamente N – S, ocupando aproximadamente 3,64 % da área total, com 1,03 unidade de dolina por quilômetro quadrado (Figura 2b).

A região está inserida no contexto de clima semiárido, com uma série histórica de chuva média anual na ordem de 678 mm (SRH, 1995). A temperatura média anual é de 22,81 °C, com umidade relativa em torno de 53,06 % (INMET, 2015).

A recarga no sistema aquífero ocorre de três formas distintas: i) a recarga autigênica, derivada da precipitação direta sobre a superfície do terreno; ii) já a recarga alogênica, decorrente de águas que percolam, superficialmente, sobre os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina e adentram o domínio onde ocorrem os carbonatos da formação Salitre. As principais drenagens referentes a recarga alogênica são os riachos Água de Rega, Das Almas e São José (Figura 1); e iii) recarga alogênica oriunda dos metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina, observadas por Valle (2004), a partir de variações nos teores de íons dissolvidos em água no exutório do aquífero.

O fluxo subterrâneo foi reconstituído a partir de valores piezométricos, obtidos nos poços que constam na base de dados da Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia – CERB. O contorno das linhas equipotenciais e as principais direções do fluxo subterrâneo estão representados na Figura 1. A superfície piezométrica indica uma direção preferencial do fluxo em direção a calha do rio Santo Antônio, principal exutório subterrâneo.

Na Figura 2d está representada um modelo hidrogeológico conceitual da área de trabalho. De maneira geral, a porosidade eficaz do aquífero é relativa a porosidade terciária dos condutos carsticos desenvolvidos na rocha carbonática e interligados por fraturas (porosidade secundária). A análise de lâminas petrográficas apontou que nos calcários e dolomitos a porosidade é extremamente baixa (< 3%) e, quando existente, está associada ao processo de dolomitização da calcita.



**Figura 2:** (a) Coluna estratigráfica simplificada (Pedreira, 2004); (b) Modelo digital de elevação; (c) Mapa de declividade; (d) Modelo hidrogeológico conceitual.

### 3. Materiais e Métodos

Nesse estudo, foram coletadas 20 amostras de água subterrânea no mês de Julho de 2015 em diferentes pontos, tais como poços tubulares, cacimbas e afloramento do nível d'água em cavernas (18 amostras foram coletadas do aquífero carstico e 2 amostras foram coletadas no aquífero fissural – Grupo Chapada Diamantina. Durante a coleta de amostras foram medidos os parâmetros *in situ*: temperatura, condutividade elétrica e pH, Eh, sólidos totais dissolvidos, utilizando o medidor multiparâmetros Multi water Quality Checker U-50 Series, fabricado pela HORIBA.

As alíquotas destinadas às análises químicas foram filtradas em conjunto Millipore, utilizando filtros de 0,45µm e os frascos fechados foram conservados sob refrigeração para posterior encaminhamento ao laboratório. As análises químicas foram efetuadas no Laboratório

de Estudos Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, segundo os métodos preconizados por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Clesceri et al., 1998).

A determinação dos cátions (Ca, Mg, Na, K) e os ânions (F, Cl, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>4</sub>) foi realizada através de cromatografia iônica (CI), enquanto a alcalinidade (HCO<sub>3</sub> e CO<sub>3</sub>) foi obtida por titulação. As análises de isótopos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA-CPGG/IF-UFBA). Na realização das análises isotópicas, foi utilizado um sistema de espectrometria de massas contendo um espectrômetro de massas de razão isotópica-MS Finnigan MAT Delta Plus e um reator automático H-Device Thermo Quest Finnigan. O aparato experimental utilizado nas medidas consiste de um espectrômetro da PICARRO modelo L2120-i, para análises de isótopos da água, contendo uma cavidade ressonante tipo ring-down de 25cm formada por três espelhos altamente reflexivos com comprimento óptico efetivo em torno de 25km e uma fonte de laser operando próximo de 1.39 $\mu\text{m}$ . Depois das sequências de limpeza da cavidade, evacuação e preenchimento com o gás N<sub>2</sub> a 99.999% de pureza, alíquotas de água de aproximadamente 2 $\mu\text{l}$  são injetadas em um vaporizador mantido a 110°C. No vaporizador, o vapor de água se mistura com o N<sub>2</sub> formando uma mistura homogênea por um tempo de 90s que é enviada ao analisador a um fluxo constante de 30ml/min.

A pressão parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) e os índices de saturação em calcita (IScal) e dolomita (ISdol) foram calculados utilizando o software PHREEQC (Parkhurst, 1999). O programa de modelagem hidrogeoquímica baseia-se no equilíbrio químico das soluções aquosas com minerais e gases e possibilita a simulação de mistura de águas, trocas iônicas, equilíbrio de soluções sob pressão ou volume constantes, dissolução e precipitação de fases minerais para alcançar o equilíbrio com a fase aquosa.

O tratamento estatístico foi realizado utilizando-se os softwares Excel 2013 e OriginPro 8.5, enquanto o software Arcgis10.1® foi utilizado para confecção de mapas. A análise espacial de dolinas foi realizada a partir de fotointerpretação de imagens na escala 1:60.000.

#### **4. Resultados e Discussões**

Os resultados das análises físico-químicas e os parâmetros hidroquímicos medidos e calculados estão representados na **Tabela 1** e na **Tabela 2**, respectivamente. O entendimento do estado físico-químico e químico da água subterrânea em aquíferos carbonáticos

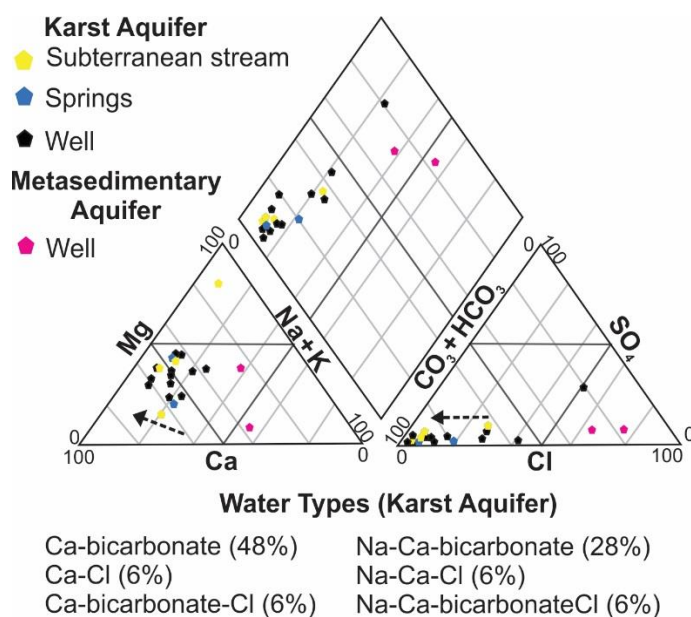
proterozoicos constitui-se de uma complexa evolução geoquímica, decorrente da interação água-rocha. Por vezes, esses parâmetros, são afetados ou induzidos por atividades antrópicas, como práticas agrícolas, despejo de esgoto e lixo (Foster e Hirata, 1987; Carreira et al., 2014; Sánchez et al., 2015).

**Tabela 1:** Parâmetros físico-químicos medidos em campo para as amostras do aquífero cárstico e aquífero matassedimentar.

Sample ID	Nature	Aquifer	T (°C)	Ph	Eh (V)	EC (µS/cm)	TDS (mg/L)
L1- 01	Water Table Upwelling	Karst	20,21	7,41	0,233	218	142
L1- 02	Well	Karst	24,17	6,92	0,27	924	592
L1- 03	Well	Karst	26,23	7,76	0,279	452	287
L1- 04	Spring	Karst	24	7,33	0,29	117	747
L1- 05	Water Table Upwelling	Karst	21,6	7,28	0,353	1420	910
L1- 06	Well	Karst	24,49	7,58	0,298	1180	752
L1- 07	Well	Karst	24,31	7,42	0,189	669	428
L1- 08	Well	Karst	26,66	6,97	0,169	2480	1590
L1- 09	Water Table Upwelling	Karst	23,29	7,61	0,135	740	473
L1- 10	Well	Karst	24,81	7,37	0,41	835	535
L1- 11	Spring	Karst	25,78	7,59	0,233	616	394
L1- 12	well	Karst	25,44	7,58	0,213	667	427
L1- 13	Well	Karst	25,15	7,15	0,165	2830	1810
L1- 14	Well	Karst	24,45	7,22	0,182	1290	829
L1- 15	Well	Karst	25,33	7,15	0,125	1090	699
L1- 16	Well	Karst	24,71	7,06	0,082	1810	1160
L1- 17	Well	Karst	23,54	8,03	0,146	475	309
L1- 18	Water Table Upwelling	Karst	25,29	7,31	0,169	711	455
L1 - 19	Well	Metasedimentary	24,54	5,02	0,16	50	0,033
L1 - 20	Well	Metasedimentary	23,80	4,72	0,25	40	0,026

Com o intuito de ilustrar a dispersão das amostras analisadas foi realizada uma abordagem analítica utilizando o diagrama de Piper (**Figura 3**), evidenciando o conteúdo de cátions e ânions das amostras. 48% das amostras coletadas no aquífero cárstico foram classificadas como  $\text{Ca}^{2+}$ -bicarbonate. A segunda classificação de água mais comum foi  $\text{Na}^{+}$ - $\text{Ca}^{2+}$ -bicarbonate, abrangendo 28% das amostras. Ou outros 24% das amostras analisadas forma classificadas igualmente como:  $\text{Ca}^{2+}$ -bicarbonate- $\text{Cl}^{-}$  (6%),  $\text{Na}^{+}$ - $\text{Ca}^{2+}$ -bicarbonate- $\text{Cl}^{-}$  (6%),  $\text{Na}^{+}$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Cl}^{-}$  (6%) e  $\text{Ca}^{2+}$ -bicarbonate- $\text{Cl}^{-}$ . Já as águas subterrâneas da aquífero fissural Chapada Diamantina forma classificadas como  $\text{Na}^{+}$ - $\text{Cl}^{-}$  e  $\text{Na}^{+}$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{K}^{-}$ - $\text{Cl}^{-}$ . No que diz respeito às águas subterrâneas do aquífero carstico Salitre observou-se, nos domínios dos ânions, uma

evolução hidroquímica de águas de cloretada para bicarbonatada. Já na competência dos cátions foi notada uma evolução de águas sódica potássica para cálcica.



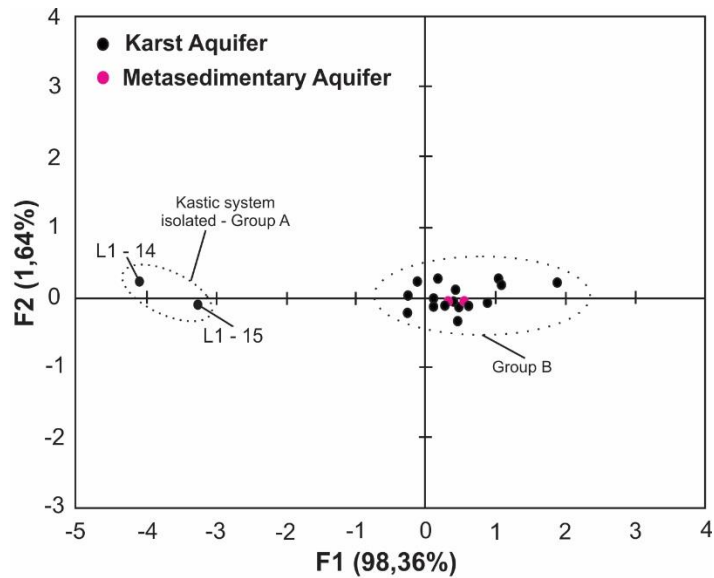
**Figura 3:** Diagrama triangular de Piper para as águas subterrâneas coletadas na porção meridional da Bacia de Irecê.

Para compreender o padrão de recarga e circulação da água subterrânea foi realizada uma análise de componente principal (ACP) entre as variáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  (**Figura 4**). Nessa análise foi possível constatar que existem dois grupos de assinaturas isotópicas distintas, sugerindo diferentes momentos de recarga para a água subterrânea (Clark e Fritz, 1997). Assinaturas isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) distintas poderiam corroborar com a interpretação proposta por Valle (2004), onde esse autor sugere a existência de uma recarga subterrânea oriunda dos metassedimentos da Grupo Chapada Diamantina. Todavia, foi observada uma assinatura isotópica semelhante com a maioria das águas subterrâneas do aquífero carste Salitre.

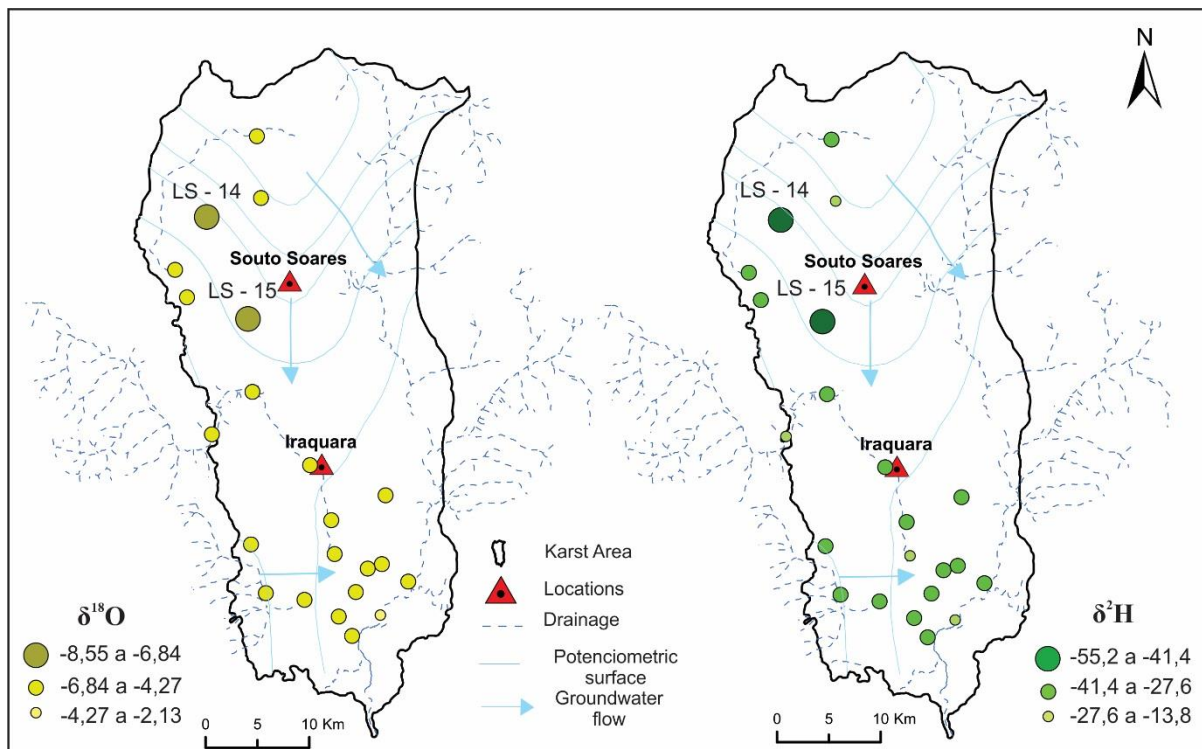
O carste salitre é dividido em pelo menos três sistemas cársticos (Laureano et al., 2016), que apresentam pouca ou nenhuma continuidade lateral, no que tange a evolução hidrogeoquímica das águas (Salles, 2017). Sendo assim, a ACP (**Figura 4**) permitiu inferir que existiram dois momentos de recarga distintos para a águas subterrâneas do aquífero me estudo. O grupo A foi interpretado como pertencente a um sistema carstico isolado do restante do aquífero, possivelmente um reservatório de águas mais antigas. Já o grupo B foi tido como um sistema cárstico que possui a mesma assinatura isotópica para a água de recarga, sugerindo momentos de recarga semelhantes para as mesmas (Clark e Fritz, 1997). Na **Figura 5**, uma



vista em mapa mostra a homogeneidade das assinaturas isotópicas analisadas ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), tendo unicamente, como valores discrepantes as águas do grupo A (**Figura 4**).



**Figura 4:** Análise de componentes principais (ACP) para os dados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  para as amostras coletadas no aquífero cástico e no aquífero metassedimentar. As componentes principais F1 e F2 explicam 100% da variância amostral.



**Figura 5:** Concentração de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  para as águas do aquífero cástico. Os valores isotópicos mais negativos consistem nos pontos LS - 14 e LS - 15, interpretados como uma água com um momento de recarga distinto ao restante do aquífero.





**Tabela 2:** Parâmetros químicos e isotópicos da área de estudo, coletados em julho de 2015. O limite de detecção (Ld) para a alcalinidade foi 2 mg/L, já para os ions foi de 0,25 mg/L. \* corresponde a valores abaixo do Ld; - consiste em parâmetros não calculados.

Sampl e ID	Nature	Aquifer	Alk (mg/L )	Cl - (mg/L )	SO4- (mg/L )	NO3- (mg/L )	Ca2+ (mg/L )	Mg2+ (mg/L )	Na+ (mg/L )	K+ (mg/L )	δ18O (‰)	δ2H (‰)	IS <sub>Cal</sub>	IS <sub>Dol</sub>	PCO2 (Pa)
L1- 01	Water Table Upwelling	Karst	83,5	6,6	1,9	1,4	2,9	12,3	0,6	3	-5,71	-29,56	- 0,01	-0,48	0,49
L1- 02	Well	Karst	214	21,5	17,6	6,7	34,1	14,4	9,7	1,2	-5,73	-35,32	0,22	0,12	0,28
L1- 03	Well	Karst	223,3	6,2	4,6	0,7	14	9,2	3,5	2	-5,57	-30,49	1,2	2,44	1,60
L1- 04	Spring	Karst	127	35,1	4,6	45,5	38,7	5,3	13,5	1,5	-5,22	-28,70	0,26	-0,19	0,20
L1- 05	Water Table Upwelling	Karst	121	58,9	28,7	20,4	48,4	10,3	21	1,2	-5,48	-34,02	0,29	0,05	0,15
L1- 06	Well	Karst	104	50,2	9	14,2	33,2	8,6	11,8	1,1	-4,86	-29,63	0,22	0,04	0,34
L1- 07	Well	Karst	234	6,6	22,1	0,5	31,6	10,9	3,6	1,9	-6,14	-33,76	1,1	1,82	0,39
L1- 08	Well	Karst	237	119,6	41,8	122,1	59,9	38,4	45,4	0,8	-5,45	-29,85	0,25	0,38	0,20
L1- 09	Water Table Upwelling	Karst	168,6	12	17,9	0,3	22,6	12,4	5,7	1,8	-4,32	-25,17	1,1	2,1	0,61
L1- 10	Well	Karst	149	23,5	5,2	6	24,6	8,8	7,5	1,4	-5,83	-32,37	0,15	-0,02	0,19
L1- 11	Spring	Karst	167	12,6	5	2	19,6	11,1	3,9	2,1	-5,73	-32,88	0,09	0,04	0,19
L1- 12	well	Karst	179	14	3,9	3,9	20,2	9,2	4,8	2,1	-4,91	-29,11	1,01	1,84	0,54
L1- 13	Well	Karst	154	261	202	13,7	131,8	38,4	64	2,9	-5,42	-32,02	0,79	1,3	0,35
L1- 14	Well	Karst	212,1	44,9	19,6	5,9	49,9	21,6	6,4	1,7	-8,55	-55,20	1,24	2,25	0,28
L1- 15	Well	Karst	180	23,4	13,7	10,6	45,4	13,7	6,4	0,9	-8,19	-49,31	0,29	0,17	0,11
L1- 16	Well	Karst	233	203	19,9	10,9	67,2	35,9	36,5	1	-5,97	-34,99	0,3	0,42	0,23
L1- 17	Well	Karst	132	7,6	2	2,4	16,9	10,8	2,7	3	-5,57	-31,23	0,05	0,03	0,22
L1- 18	Water Table Upwelling	Karst	167	12	10,3	2,2	26,4	11,4	3,5	2	-5,70	-31,64	0,17	0,09	0,16
L1 - 19	Well	Metasedimentary	2,60	3,30	0,60	1,20	0,80	0,80	1,20	0,40	-5,48	-29,70	-	-	-
L1 - 20	Well	Metasedimentary	*	2,50	0,40	0,70	0,60	*	1,00	*	-5,77	-31,53	-	-	-

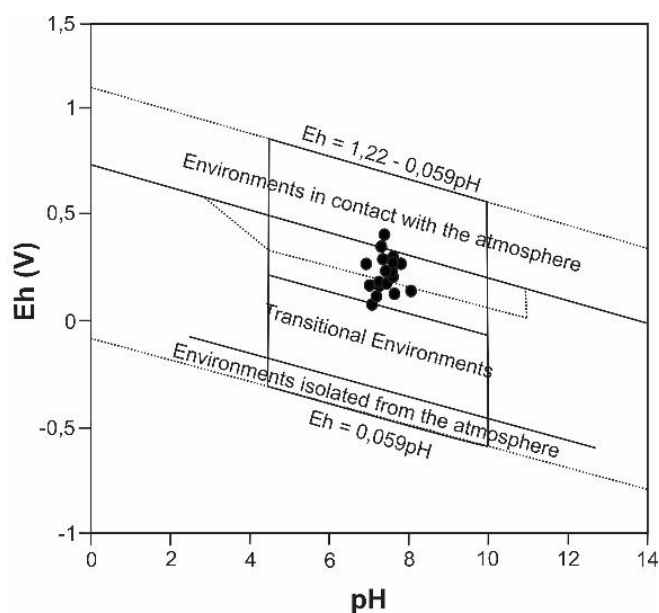
#### 4.1 Relação Iônica Característica

A ordem relativa de concentração entre os principais ânions no aquífero é dada por  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ , para 44,4% das amostras. Por outro lado, os principais cátions no sistema são definidos por  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ , em 77,8% das amostras, e  $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  em 22,2% das análises realizadas. A inversão entre  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  como cátion dominante foi atribuída à precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) na forma de aragonita, já que as amostras onde foram observadas tal inversão foram coletadas nos exutórios do aquífero, em locais onde registrou-se, em campo, a precipitação deste mineral.

#### 4.2 Propriedades físico-químicas

Os sólidos totais dissolvidos em água (STD) variaram de 142 a 910 mg/l, para as águas do grupo 1. Quando contaminadas, esses valores podem atingir até 1810 mg/l (Grupo 3). A temperatura (T) oscilou entre 20,21 a 26,66 °C, com valor médio de 24,6 °C.

Todas as águas foram caracterizadas por um pH neutro, variando entre 6,92 e 8,03. O ambiente em estudo é tido como oxidante, com contato direto ou parcial com a atmosfera (**Figura 7**). Por fim, a condutividade elétrica apresentou valores variando entre 117 e 1420  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , podendo chegar a 2830, para as águas contaminadas.

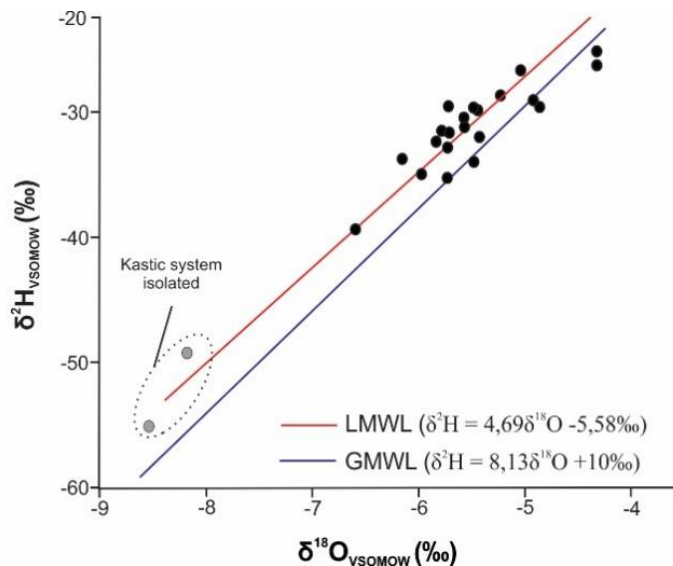


**Figura 7:** Diagrama Eh - pH com os limites do campo de estabilidade da água em ambientes naturais, em função dos valores de Eh e pH medidos em campo (modificado de Carvalho, 1995).

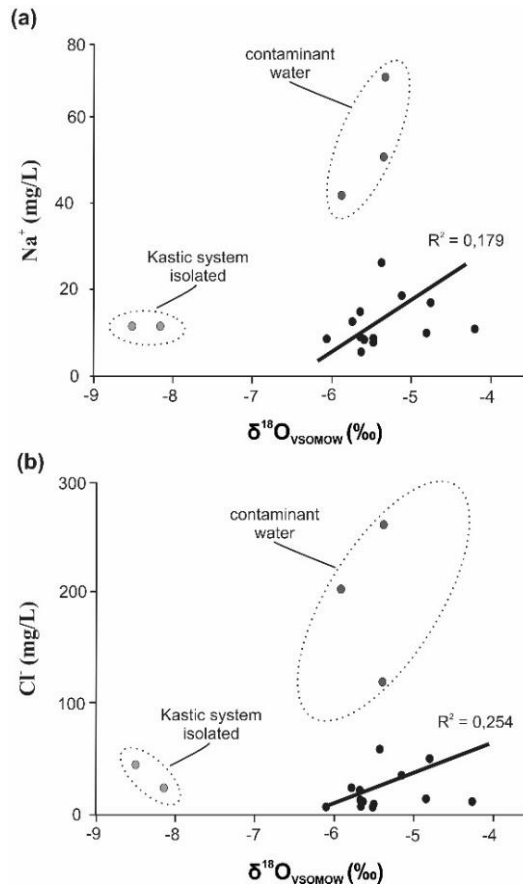
### 4.3 Isótopos estáveis na água

As amostras de água subterrâneas apresentaram valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  e  $\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$  variando de -8,55‰ a -4,32‰ e -55,2‰ a -25,17‰, respectivamente (**Figura 8**). A linha meteórica local (LMWL – linha em vermelho), elaborado a partir das amostras coletadas, é definida pela seguinte regressão linear:  $\delta^2\text{H} = 4,69\delta^{18}\text{O} - 5,58\text{‰}$ . A LMWL é paralela, mas ligeiramente mais positiva que a reta meteórica global (GMWL – linha azul), dada pela regressão linear:  $\delta^2\text{H} = 8,13\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$  (Rozanski et al., 1993), sugerindo uma rápida infiltração para água subterrânea.

O processo de evaporação é um fenômeno que pode aumentar a concentração de íons na água subterrânea em regiões áridas e semi-áridas. A **Figura 9** mostra uma correlação entre  $\text{O}^{18}$  e cloreto (**Figura 9A**), e  $\text{O}^{18}$  em relação ao sódio (**Figura 9B**). Essa figura demonstrou que não houve enriquecimento nos teores de Cl e Na com o fracionamento isotópico ( $\delta^{18}\text{O}$ ), excluindo a possibilidade da influência da evaporação, na zona não saturada do aquífero, no processo de salinização da água subterrânea. Portanto, um mecanismo adicional é necessário para explicar a evolução desse processo.



**Figura 8:** Linha meteórica local (LMWL), elaborada a partir da relação isotópica medida nas águas analisadas, em comparação com a reta meteórica global (GMWL (Rozanski et al., 1993). Os dados do sistema cárstico isolado não foram utilizados nessa regressão.



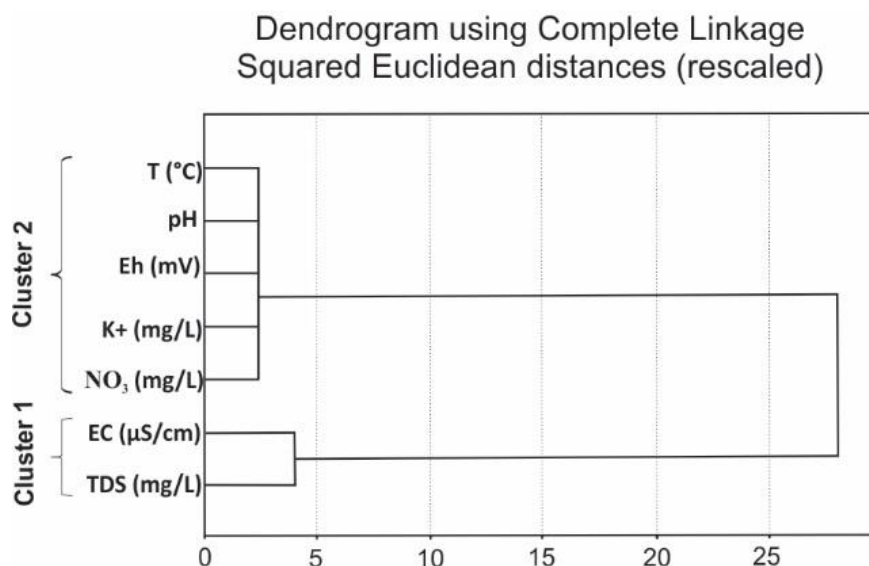
**Figura 9:** Correlações em (a) entre  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\text{Na}^+$  (mg/L); e (b) entre  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\text{Cl}^-$  (mg/L). Na elaboração da regressão linear (a e b) não foram utilizados os dados do sistema isolado, bem como as águas contaminadas.

#### 4.4 Modelagem Geoquímica

O intervalo de concentração de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) na água foi de 0,5 a 122,1 mg/l. A presença de nitrato como forma dominante do nitrogênio é atribuída ao fluxo turbulento nos condutos cársticos. Esse tipo de escoamento aumenta o oxigênio dissolvido em água, gerando uma condição favorável ao nitrato em relação ao nítrito.

Quando práticas agrícolas deterioram a qualidade da água, deverá ocorrer uma correlação positiva entre nitrato e o potássio (Nitrato de K) (Murad *et al.*, 2011). Com o intuito de compreender a mobilidade química desses elementos no meio hidrogeológico em estudo, foi realizada uma análise de cluster utilizando o critério de *Complete Linkage* (vizinho mais afastado), representada na (Figura 10). São observados 2 clusters: cluster 1 e cluster 2 (Figura 10). No cluster 1 foram agrupados a condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e os STD. Já no cluster 1 encontram-se agrupado os parâmetros temperatura ( $^\circ\text{C}$ ), pH, Eh (mV),  $\text{NO}_3^-$  e K. Essa análise permitiu concluir que a mobilidade do nitrato e do K no meio aquoso ocorre de maneira similar, em função de variações da T, pH ou Eh. Como exemplificado na Tabela 1 esses parâmetros

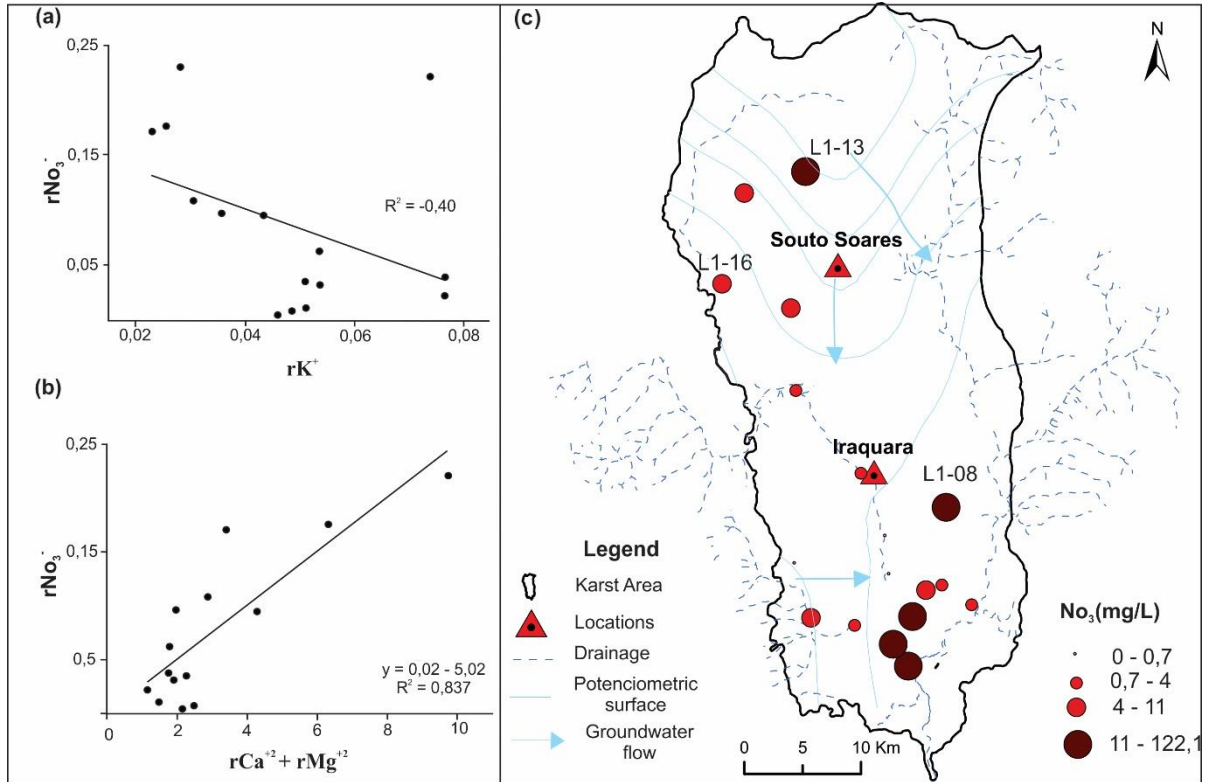
físico-químicos apresentam pouca variação, indicando a baixa interferência dos mesmos na associação dos íons em questão.



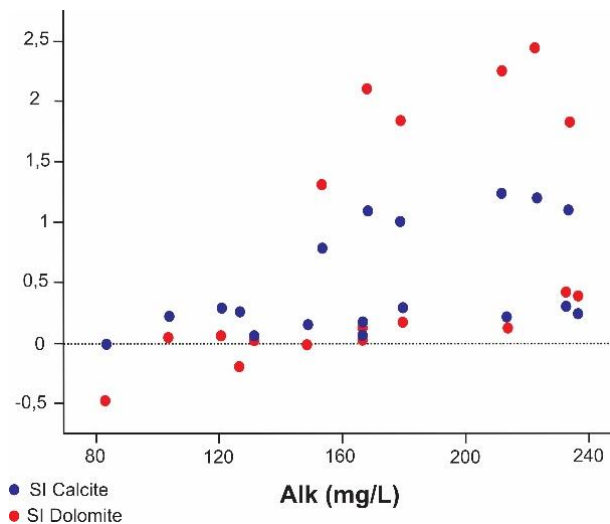
**Figura 10:** Dendrograma mostrando a classificação em dois cluster (1 e 2).

A correlação negativa entre o potássio e o nitrato (**Figura 11a**) sugere que o NO<sub>3</sub> presente na água não seja resultante de atividades agrícolas. Por outro lado, a **Figura 11b** mostra valores de nitrato em função de Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup>, após retirada dos valores discrepantes, com elevado coeficiente de correlação, na ordem de 0,837 (n=15). Sendo assim, a presença do nitrato na água, em baixas concentrações, é atribuída à interação água-rocha. Os valores discrepantes de nitrato foram interpretados como resultantes da deterioração da água, em consequência do despejo indevido de lixo orgânico, ou pela utilização de fertilizantes na agricultura. Na **Figura 11c**, uma vista em mapa mostra que os teores mais elevados de nitrato na água subterrânea ocorrem associados ao sistema exutório do aquífero (Porção Sul) e nas somadas as águas contaminadas (**Figura 6**) – pontos LS- 08, LS-13 e LS-18.

Águas tendem a precipitar calcita (CaCO<sub>3</sub>) e dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) quando saturadas nessas fases minerais, e dissolve-os quando insaturadas. O índice de saturação (IS) é o parâmetro mais utilizado para quantificar a saturação de fases minerais na água subterrânea. O resultado no cálculo dos IS demonstrou que as águas em estudo se apresentam saturadas ou parcialmente saturadas em calcita e dolomita (**Figura 12**). O índice de saturação para a calcita variou de -0,01 a 1,24. Já o índice de saturação em dolomita variou entre -0,48 e 2,44, sugerindo que a água apresenta pouca agressividade para dissolver esses minerais presentes na rocha.



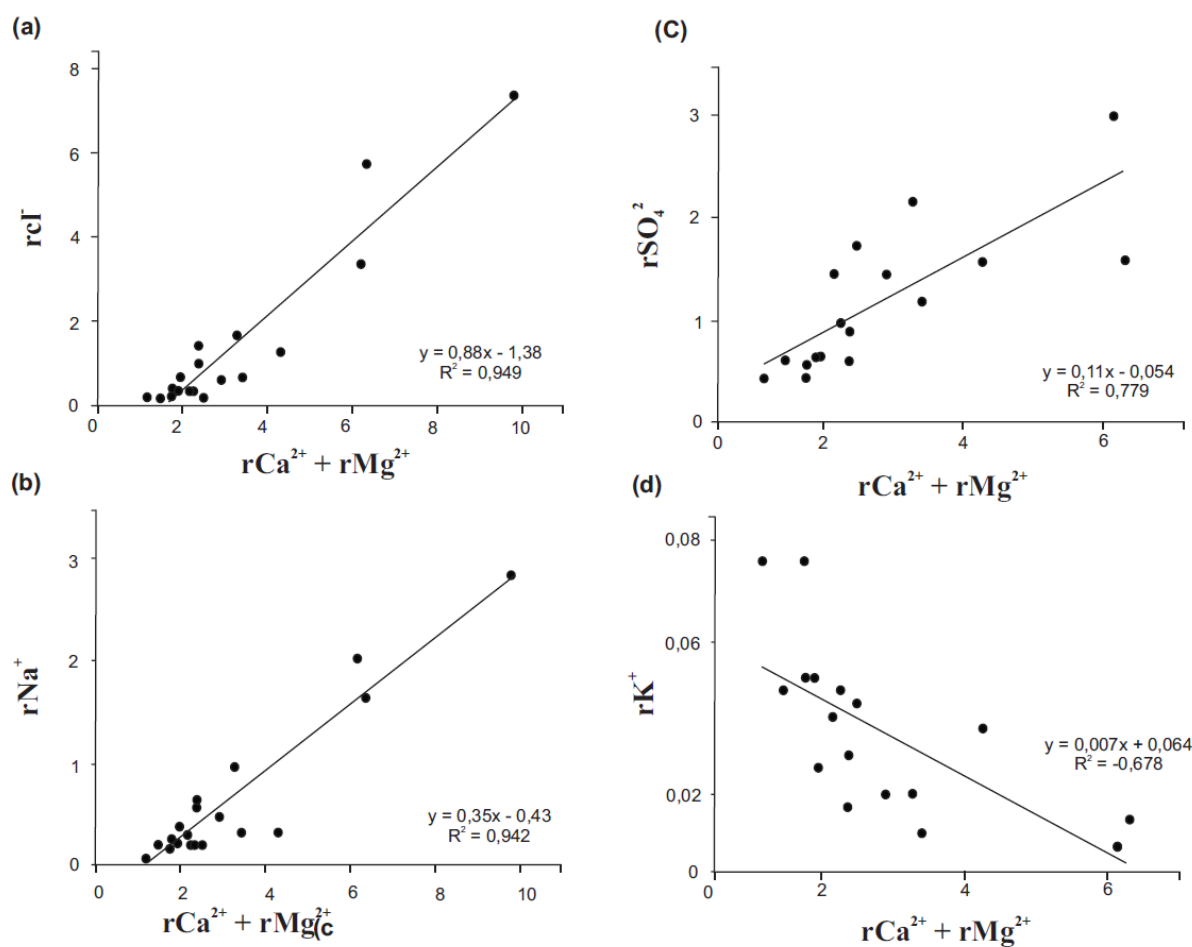
**Figura 11:** (a) Correlação entre  $r\text{NO}_3^-$  Vs  $r\text{K}^+$ , o baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = -0,4$ ) sugere que a presença desses ions não água subterrânea não estão associadas a práticas agrícolas. (b) Correlação entre  $\text{NO}_3^-$  Vs  $r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+}$ , sugerindo que com a evolução do processo de dissolução da rocha existe um aumento na concentração de nitrato na água subterrânea; (c) Distribuição espacial dos teores de nitrato na água subterrânea.



**Figura 12:** Índices de saturação em calcita (IS Calcita) e dolomita (IS Dolomitas) vs alcalinidade total ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^-$ ) para as amostras analisadas.

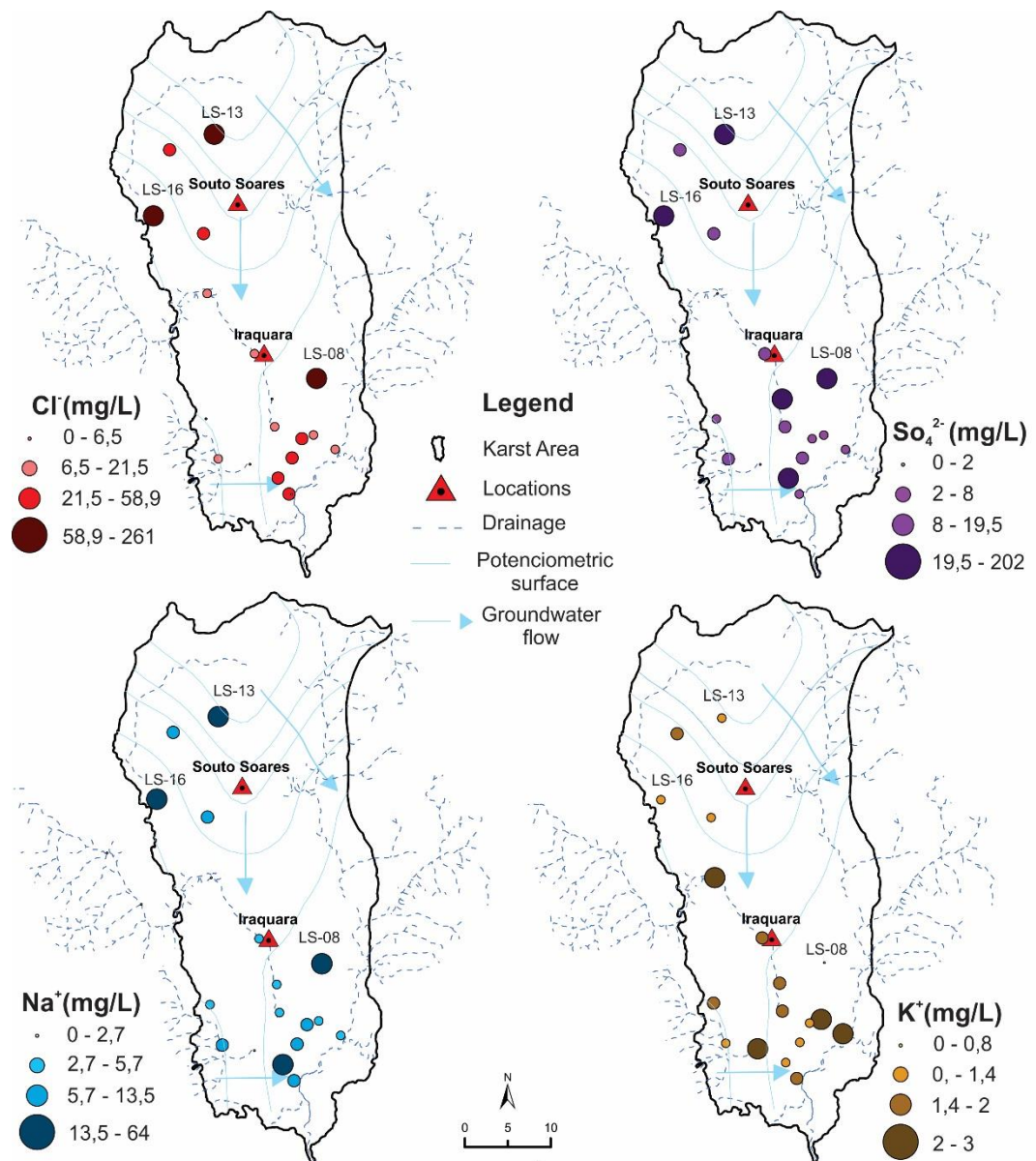
Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) são os principais componentes formadores da rocha carbonática em estudo (**Figura 2**). Esses minerais são dissolvidos em uma solução aquosa. Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) são os principais componentes formadores da rocha carbonática em estudo (**Figura 2**). Esses minerais são dissolvidos em uma solução

aquosa, provocando um desequilíbrio no sistema. Essa instabilidade libera íons de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na água. A evolução dessa reação provoca o processo de dissolução. A **Figura 13** demonstra correlações entre  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  e  $\text{K}^+$ , em função  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  (todos os valores transformados para milequivalente). A Alta correlação existente (**Figura 13a, b e c**) demonstrou que com o aumento da dissolução da rocha existe também um aumento nos teores e  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{SO}_4^-$  na água subterrânea, sugerindo que a presença desses elementos na água ocorre em reposta de um mesmo processo de salinização, associado à dissolução da rocha carbonática. Já para o rK (**Figura 13d**) observa-se uma relação inversa, sugerindo que o teor K diminui com o distanciamento da área de recarga do aquífero, possivelmente associado a adsorção pelas argilas ou matéria orgânica.



**Figura 13:** Modelagem geoquímica para as amostras analisadas. (a)  $\text{rCl}^-$  vs  $\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$ ; (b)  $\text{rNa}^+$  vs  $\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$ ; (c)  $\text{rSO}_4^{2-}$  vs  $\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$ ; e (d)  $\text{rK}^+$  vs  $\text{rCa}^{2+} + \text{rMg}^{2+}$ .

A **Figura 14** demonstra a distribuição espacial dos ions de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  e  $\text{K}^+$  para as águas analisadas no aquífero carbonático. Observa-se, para os ions de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$ , um aumento na concentração desses elementos no sentido do exutório da bacia (Rio Santo Antônio). Todavia, ocorrem, pontualmente, anomalias nos teores desses elementos associados à contaminação das águas subterrâneas (**Figura 6**), nos pontos LS-08, LS-13 e LS-16. Já em relação a concentração de  $\text{K}^+$  na água subterrânea observa-se uma decrescencia no sentido do exutório do aquífero.



**Figura 14:** Distribuição espacial dos teores de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$  e  $\text{K}^+$  para o aquífero cárstico.

Os elevados teores de  $\text{K}^+$  (**Figura 14**) não coincidem com as anomalias nos teores de nitrato na água subterrânea (**Figura 11**). Sendo assim, os autores acreditam o uso de agrotóxico



(nitrado de K) não consiste em uma importante fonte de contaminação para a água subterrânea. Atribuiu-se como a principal fonte contamiante para a água subterrânea na região a falta de saneamento básico em grande parte da área de estudo.

## **5. Conclusão**

O aquífero carbonático é de natureza livre e apresenta superfície piezométrica acompanhando a topografia local, com fluxo subterrâneo preferencial em direção a calha do rio Santo Antônio. Observa-se uma evolução hidrogeoquímica de águas cloretada sódica cálcica, evoluindo para águas de composição bicarbonatada cálcica.

A partir da técnica de agrupamento, denominada análise de componentes principais (ACP), é possível individualizar três grupos para as águas analisadas. O primeiro grupo corresponde as águas naturais, sem degradação de sua qualidade por atividades antrópicas. Já segundo grupo remete a águas naturais de um sistema cárstico isolado, com assinatura isotópica distinta ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), sugerindo um outro momento de recarga para essas águas. Por fim, o terceiro grupo é relacionado a águas contaminadas por atividades antrópicas recentes, como despejo de lixo e esgoto.

O estudo isotópico demonstra que não há enriquecimento nos teores de Na e Cl, na zona vadosa do aquífero, pelo processo de evaporação. Isso se dá pela rápida infiltração da água no solo, facilitada pelo elevado número de dolinas no modelado – na ordem de 1,03 unidade de dolina por quilômetro quadrado.

Por fim, o modelamento geoquímico das águas sugere que as presenças de nitrato, em baixas concentrações, de cloreto, sódio e sulfato, podem ser atribuídas ao mesmo processo de salinização, associado a dissolução da rocha carbonática.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. À Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia. Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – NEHMA e seus participantes. Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa.

## Referências

- Alvarez, M. P., Dapena, C., Bouza, P. J., Rios, I., Hernandez, M. A., 2015. Groundwater salinization in arid coastal wetlands: a study case from Playa Fracasso, Patagonia, Argentina. *Environ Earth Sci* 73, 7983–7994.
- Auler, A. S., Farrant, A. R., 1996. A Brief Introduction to Karst and Caves in Brazil. Univer. Britl Speloca. Soc. Volume 20, 187-200.
- Barreto E. A. S., 2010. Reconstituição aa Pluviosidade Da Chapada Diamantina (Ba) Durante o Quaternário Tardio Através De Registros Isotópicos (O E C) Em Estalagmites. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica – USP.
- Berden G., R. Engeln. “Cavity Ring-Down Spectroscopy – Techniques and Applications”. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- Bichuette M. E.; Rantin B., Hingst-Zaher E.; Trajano E., 2015. Geometric morphometrics throws light on evolution of the subterranean catfish *Rhamdiopsis krugi* (Teleostei: Siluriformes: Heptapteridae) in eastern Brazil. *Biological Journal of the Linnean Society*, 114, 136–151.
- Bomfim L. F. C., Rocha A. J. D., Pedreira A. J., Morais Filho J. C., Guimarães J. T., Tesch N. A., 1985. Projeto Bacia de Irecê. Relatório Final. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM.
- Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C.B., Bullen, T.D., Zuppi, G.M., 2008. Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss–Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology* 352, 267– 287.
- Carol, E., Kruse, E., Mas-Pla J., 2009. Hydrochemical and isotopical evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. *Journal of Hydrology* 365 335–345.
- Carreira, P. M., Marques, J. M., Nunes, D., 2014. Source of groundwater salinity in coastline aquifers based on environmental isotopes (Portugal): Natural vs. human interference. A review and reinterpretation. *Applied Geochemistry* 41 163–175.
- Carvalho, I. G, 1995. Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos. Salvador: Bureau Gráfica e Editora. 239 p.

Cary, L., Giraud, E. P., Bertrand, G., Kloppmann, W., Aquilina, L., Martins, V., Hirata R., Montenegro, S., Pauwels, H., Chatton, E., Franzen, M., Aurouet, A., 2015. Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): A multi-isotope approach. *Science of the Total Environment* 530–531, 411–429.

Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., EATON, A. D., 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association, Washington. 1325 p. ISBN 0875532357.

Currell, M., Cendón, D. I., Cheng X., 2013. Analysis of environmental isotopes in groundwater to understand the response of a vulnerable coastal aquifer to pumping: Western Port Basin, south-eastern Australia. *Hydrogeology Journal* 21, 1413–1427.

Ettayfi, N., Bouchaou, L. Michelot, J. L., Togma, T., Warner, N., Boutaleb, S., MAssault, M., Lgourna, Z., Vengosh, 2012. Geochemical and isotopic (oxygen, hydrogen, carbon, strontium) constraints for the origin, salinity, and residence time of groundwater from a carbonate aquifer in the Western Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Journal of Hydrology* 438-439, 97-111.

Falcone, A. F., Falgiani, A., Parisse B., Petitta M., Spzzico M., Tallini M, 2008. Chemical and isotopic ( $d18O$ ,  $d2H$ ,  $d13C$ ,  $222Rn$ ) multi-tracing for groundwater conceptual model of carbonate aquifer (Gran Sasso INFN underground laboratory – central Italy). *Jornal of Hydrology* 357, 368-388.

Ford, D.C., Williams, P.W, 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Geography. Second Edition.

Foster, S.S.D., Hirata R.C.A, 1987. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. EHO/PAHO/HPE/CEPIS, Lima, p 87.

Gattacceca, J. C., Vallet-Coulomb, C., Mayer A., Claude. C Radakovitch, O. Conchetto, E., Hamelin, B., 2009. Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland. *Journal of Hydrology* 378, 46–61.

Ghiglieri, G., Carletti, A., Pittalis, D., 2012. Analysis of salinization processes in the coastal carbonate aquifer of Porto Torres (NW Sardinia, Italy). *Jornal of Hydrology*, 432-433, 43-51.

GUERRA A. M, 1986. *Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê-Bahia*. Tese de Doutorado. Programa de Geologia de Aplicação – USP.

- Hamouda, M. F. B., Tarhouni, J., Leduc, C., Zouari, K., 2001. Understanding the origin of salinization of the Plio-quadernary eastern coastal aquifer of Cap Bon (Tunisia) using geochemical and isotope investigations. *Environ Earth Sci* 63, 889–901.
- Han, D.M., Song, X.F., Currell, M. J., Yang, J.L., Xiao, G.Q., 2014. Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou Bay, China. *Journal of Hydrology* 508, 12–27.
- IBGE/SEI, 2013. Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia. Escala 1:100.000. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), accessed in December 2015. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.
- Kim, Y., Leeb, K. L., Koha, D. C., Leea, D., Leea, S., Parkc, W., Kohd G., Woone N., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology* 270, 282–294.
- Kumar, M., Someshwar, R. M., Deka, J. P., Ramanathan, Al., Kumar, B., 2015. Integrated hydrogeochemical, isotopic and geomorphological depiction of the groundwater salinization in the aquifer system of Delhi, India. *Journal of Asian Earth Sciences* 111, 936–947.
- Laureano, F. V., Karmann, I., Granger, D. E., Auler, A. S., Almeida, R. P., Cruz, F. W., Stricks, N. M., Novello, V. F., 2016 Two million years of river and cave aggradation in NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution. *Geomorphology* 273, 63–77.
- Madioune, D. H., Faye, S., Orban, F., Brouyère, S., Dassargues, A, Mudry, J., Stumpp, S., Maloszewski, P., 2014. Application of isotopic tracers as a tool for understanding hydrodynamic behavior of the highly exploited Diass aquifer system (Senegal). *Journal of Hydrology* 511, 443–459.
- Misi, A., 1979. Grupo Bambuí no Estado da Bahia. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1, 119-154.
- Moller, P., Weise, Æ S. M., Tesmer, Æ M., Dulski, Æ P., Pekdeger, Æ A., Bayer, Æ U., Magri, Æ F., 2008. Salinization of groundwater in the North German Basin: results from conjoint investigation of major, trace element and multi-isotope distribution. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, 97:1057–1073.
- Monjerezi, A. C. M., Vogt, R. D., Aagaard, P., Gebru, A. G., Saka, J. D.K., 2011. Using  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\text{d}^{18}\text{O}$  and  $\text{d}^2\text{H}$  isotopes along with major chemical composition to assess groundwater salinization in lower Shire valley, Malawi. *Applied Geochemistry* 26, 2201–2214.

- Montety, V., Radakovitch, O., Coulomb, C. V., Blavoux, B., Hermitte, D., Valles, V., 2008. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhône delta (Southern France). *Applied Geochemistry* 23, 2337–2349.
- Moussa, A. B., Zouari, K., Marc, V., 2011. Hydrochemical and isotope evidence of groundwater salinization processes on the coastal plain of Hammamet–Nabeul, north-eastern Tunisia Amor Ben. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 167–178.
- Murad, A. A., Garamoon, H., Hussein, S., Nuaimi, H. S., 2011. Hydrogeochemical characterization and isotope investigations of a carbonate aquifer of the northern part of United Arab Emirates. *Journal of Asian Earth Sciences* 40, 213-225.
- Parkurst, D. L., Appelo, C. A. J., 1999. User guide to PHREEQC (version 2) – A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. US Geological Survey, Water Resources Investigations Report, 95-4259, Denver, Colorado.
- Pauwels, A. H., Aquilina, L., Negrel, P., Bourb, O., Perrina, J., Ahmed, S., 2013. Groundwater salinization in hard-rock aquifers: impact of pumping and vertical transfers. *Earth and Planetary Science* 7, 660 – 664.
- Pedreira A.J., 2004. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Rina, K., Datta, P. S., Singh, C. K., Mukherjee, S., 2013. Isotopes and ion chemistry to identify salinization of coastal aquifers of Sabarmati River Basin. *Current Science*, 104 (3).
- Rosenthal E., Guttman, J., Sabel, R., Llerd, P., 2009. Limiting hydrochemical factors for sustainability of water resources: The Cisjordanian experience. *Chemie der Erde* 69, 191–222.
- Rozanski, K., Araguas, L., Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *AGU Geophys. Monogr.* 78, 1-37.
- Sánchez, D., Barberá, J. A., Mudarra, M., Andreo, B., 2015. Hydrogeochemical tools applied to the study of carbonate aquifers: examples from some karst systems of Southern Spain. *Environ Earth Sci* 74, 199-2015.
- Schiavo, M.A., Hauser, S., Povinec, P.P., 2009. Stable isotopes of water as a tool to study groundwater–seawater interactions in coastal south-eastern Sicily. *Journal of Hydrology* 364, 40– 49.

- Souza S.L., Toledo L.A.A., Brito P.C.R., Fróes R.J.B.; Silva R.W.S., 2002. Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, v. 1.
- Souza, S. L., Brito, P. C. R., Silva, R. W. S., 1993. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM.
- Stoecker, F., Babel, M. S., Gupta, A. D., Rivas, A. A., Evers M.; Kazama F. Nakamura T., 2013. Hydrogeochemical and isotopic characterization of groundwater salinization in the Bangkok aquifer system, Thailand. *Environ Earth Sci* 68, 749–763.
- Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH), 1995. Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacias dos Rios Verde e Jacaré. Margem Direita do Lago de Sobradinho
- UNESCO, 2004. Groundwater resources of the world and their use. IHP-VI, SERIES ON GROUNDWATER NO. 6
- Valle, M. A. Hidrogeoquímica do Grupo Una (Bacias De Irecê E Salitre): um Exemplo da Ação de Ácido Sulfúrico no Sistema Cárstico. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2004.
- Vinson. D. S. Schwartz, H. G.; Dwyer, G. S., Vengosh A., 2011. Evaluating salinity sources of groundwater and implications for sustainable reverse osmosis desalination in coastal North Carolina, USA. *Hydrogeology Journal* 19, 981–994.
- Wang, Y., Jiao, J. J., 2012. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China. *Journal of Hydrology* 438–439, 112–124.
- Zalicki P., R. N. Zare. "Cavity ring-down spectroscopy for quantitative absorption measurements." *J. Chem. Phys.* 1995.102,pp. 2708-2717.
- Zhang, W., Chen, Xi, Tan, H., Zhang, Y. Cao, J, 2015. Geochemical and isotopic data for restricting seawater intrusion and groundwater circulation in a series of typical volcanic islands in the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin* 93, 153-162.

## CAPÍTULO 5

### **ARTIGO 3 – Avaliação de risco geotécnico, associado ao colapso e à subsidência em áreas cársticas, município de Iraquara, Chapada Diamantina, Brasil**

---

#### **Resumo**

A evolução morfológica de um sistema cárstico está vinculada a um conjunto de processos físicos e químicos, associados à dissolução da rocha que esculpem formas de relevo peculiares. Esse sistema é naturalmente mais frágil e vulnerável quando comparados com outros sistemas naturais. Devido a isso, tem recebido uma crescente atenção da comunidade científica nas últimas décadas. O objetivo desse trabalho foi delimitar zonas com diferentes graus de riscos geotécnicos, associados ao colapso e subsidência de dolinas, no município de Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brasil, bem como compreender seus fatores determinantes. Dados geológicos, mapa de fenômenos cársticos e análise visual em campo, foram utilizados para categorizar zonas com diferentes susceptibilidades a nucleação de novas dolinas, a partir de um índice de risco geotécnico. Esse índice foi definido a partir da soma dos fatores de riscos geológico, densidade de lineamentos e densidade de dolinas. Os locais que apresentaram maior vulnerabilidade geotécnica correspondem a regiões de rochas carbonáticas aflorantes, com elevada densidade de fotolineamentos, onde ocorrem 2,62 dolinas por km<sup>2</sup>. Os processos associados ao colapso e subsidência em áreas cársticas consistem da combinação de diversos fatores, tornando difícil prevê-los com exatidão. Entretanto, quando as relações entre esses processos e seus fatores são compreendidas, torna-se possível delimitar zonas de diferentes susceptibilidades ao colapso e à subsidência. O índice de risco geotécnico proposto não corresponde a probabilidade de riscos em termos quantitativos, apenas indica áreas mais susceptíveis a serem afetadas pela subsidência e colapsos.

Palavras-chave: Carste, rochas carbonáticas, Chapada Diamantina, Colapso e subsidência.

#### **1. Introdução**

Terrenos cársticos cobrem aproximadamente 20% da superfície terrestre e são desenvolvidos principalmente em rochas carbonáticas, onde 22% da população mundial dependem direta ou indiretamente dos recursos hídricos subterrâneos (Ford e Williams 2007, Huggett 2007). Devido a sua complexa morfologia, terrenos cársticos são particularmente mais frágeis e vulneráveis a danos ambientais quando comparados com a maioria dos outros sistemas

naturais (Elhatip 1995; Zhou 2006; Ford e Williams 2007, Goldsheider e Drew 2007). Com isso, o entendimento das propriedades desse sistema consiste numa importante ferramenta para gestão das águas subterrâneas (Galvão *et al.* 2015) e dos riscos geotécnicos associados.

Problemas geotécnicos, associados ao colapso e subsidência, são característicos de terrenos cársticos. Esse fenômeno pode afetar diretamente a vida das pessoas e ocasionar situações de sérios riscos ambientais e econômicos (Sallun Filho 2012; Gutiérrez *et al.* 2014). O abaulamento da superfície pode ocorrer por processos naturais ou ser induzido por atividades antrópicas, principalmente aquelas relacionadas com a superexploração dos recursos hídrico subterrâneo (He *et al.* 2003; Galve *et al.* 2009a). Os processos naturais e antrópicos diferem, principalmente, pela velocidade em que a subsidência se inicia, ocorrendo de forma consideravelmente mais acelerada em situações com interferência antropogênica direta (Lei *et al.* 2001; Galvão *et al.* 2015).

Colapsos e subsidências em áreas cársticas são normalmente influenciados por diversos fatores naturais e/ou antrópicos, como: i) grau de carstificação; ii) aumento da entrada d'água no solo (água da chuva, inundações, vazamentos de tubos, irrigação, entre outros); iii) rebaixamento do nível d'água (mudanças paleoambientais, extração de água subterrânea e tectônica); iv) represamento de água; v) erosão e escavação do epicarste; vi) escavações subterrâneas; vii) remoção da vegetação; viii) distância de falhas e fraturas; e ix) descongelamento do solo (Hu *et al.* 2001; He *et al.* 2003; Zhou 2006; Galve *et al.* 2009a, b; Keqiang *et al.* 2009; Cooper e Gutiérrez 2013; Gutiérrez *et al.* 2014; Galvão *et al.* 2015). Colapsos catastróficos diretamente sobre cavidades ocorrem em menos de 1% dos casos. Na maioria dos relatos, há uma remobilização da cobertura não consolidada para o interior das cavernas, abaulando a superfície (Ford e Williams 2007).

Diversos relatos sobre colapsos e subsidências em áreas cársticas vêm sendo reportados ao redor do mundo: Tangshan, China (Hu *et al.* 2001); Ebro Valley, Saragoza, Espanha (Galve *et al.* 2009a), Sango, Tennessee, EUA (Siska *et al.* 2016). No Brasil, os municípios de Lapão (Bahia), Mairinque e Cajamar (São Paulo), Sete lagos e Lagoa Santa (Minas Gerais), Almirante Tamandaré e Bacaiuva do Sul (Paraná) e Teresina (Piauí) são exemplos de locais onde processos geotécnicos acarretaram em inúmeros danos ambientais e matérias (Silva 1998; Santos 2008). Entretanto, a distribuição e probabilidade de ocorrência de novos problemas geotécnicos consistem numa lacuna importante para a maioria dos municípios supracitados.

Uma importante tarefa para mitigação de riscos geotécnicos, associados a colapsos e subsidências cársticas, são informações sobre distribuições e probabilidade de novas



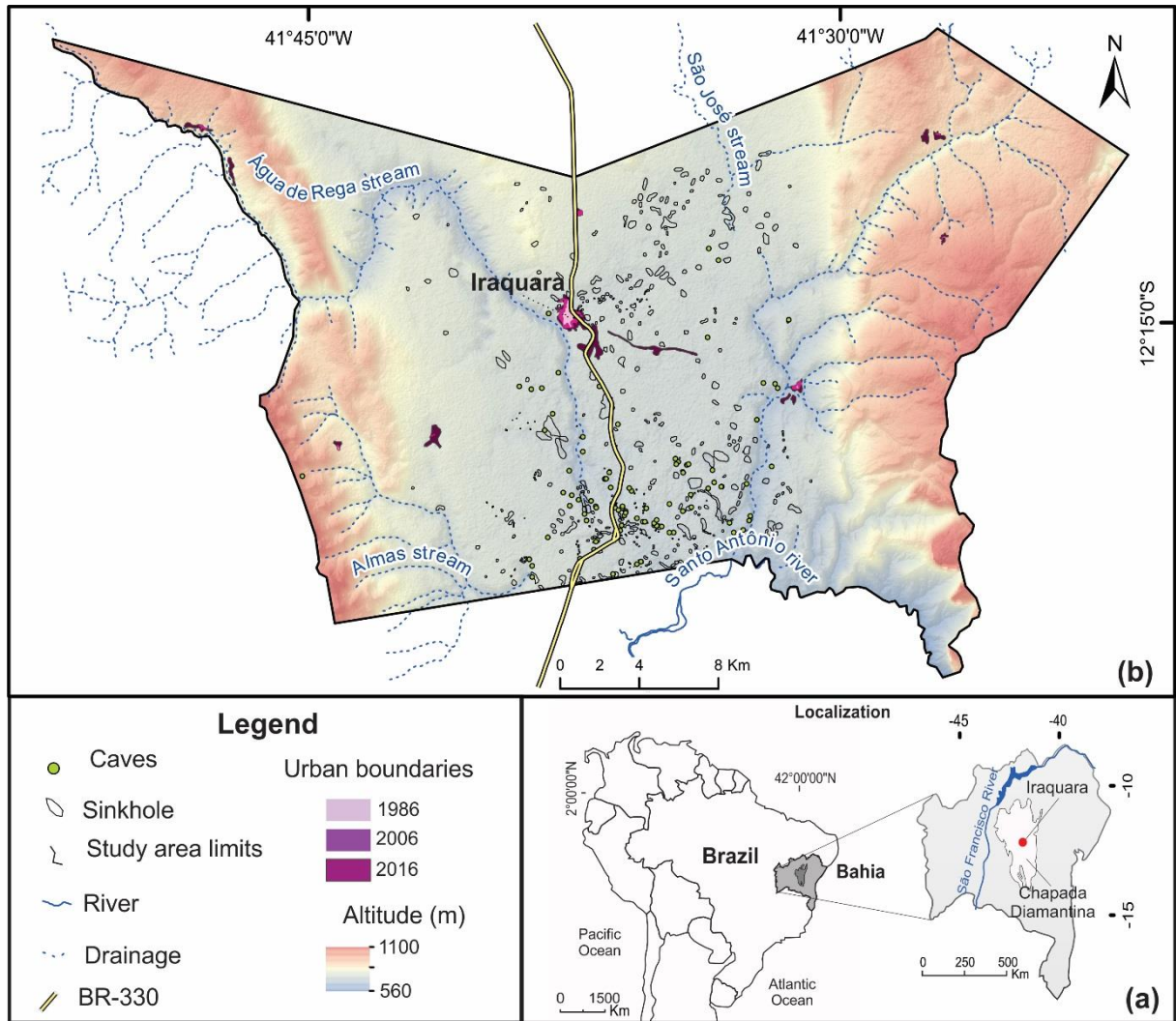
ocorrências (Gutiérrez *et al.* 2008). Mapas de suscetibilidade consistem na probabilidade de ocorrência, ou não, de dolinas em locais específicos (Galve *et al.* 2011). As zonas delimitadas em mapas têm, por finalidade, expressar diferentes níveis de nucleação de novas dolinas (Hu *et al.* 2011, Galvão *et al.* 2015 e Siska *et al.* 2016).

Fundado em 1962, o município de Iraquara, alvo desse estudo, desenvolve-se sobre uma região de elevada densidade de galerias subterrâneas (Auler e Ferrant, 1996, IBGE 2016). A variedade de geoformas, associada a um crescimento desordenado e a falta de planejamento urbano, conota ao município, elevados riscos geotécnicos. Esse trabalho tem por objetivo delimitar zonas com diferentes graus de riscos, associados ao colapso e subsidência de dolinas, no município de Iraquara, Chapada Diamantina, Estado da Bahia, Brasil. Esse conhecimento é de suma importância para o desenvolvimento e proteção do meio físico e deve ser utilizado como subsídio para um plano de manejo ambiental municipal.

## 2. Descrição da área

Iraquara localiza-se no Estado da Bahia, Brasil, 340 km a oeste de Salvador, capital do estado (Fig. 1a). Esse município possui uma população de, aproximadamente, 25.000 habitantes, dispostos sobre uma área de 991 km<sup>2</sup>, sendo que houve, nos últimos seis anos, um crescimento demográfico de aproximadamente 10% (IBGE 2016). A ocupação urbana ocorre principalmente na porção central do município. Estudos elaborados a partir de imagens de satélite (Fig. 1a) mostram que o *boom* ocupacional na região se deu no ano de 2006.

As principais atividades econômicas limitam-se aos cultivos de tomate, oleaginosos, umbu e ao turismo de aventura, associado, principalmente, às cavernas. Essa região está inserida em um dos mais expressivos sítios paisagísticos do Brasil, a Chapada Diamantina. Para Auler e Ferrant (1996) as redes de galerias existentes na região compõem um dos mais relevantes sítios espeleológicos do país, onde, atualmente, encontram-se registradas 99 cavidades (CANIE 2017), constituindo possivelmente, o local de maior densidade de galerias subterrâneas por unidade de área do Brasil.



**Fig. 1.** (a) Localização da área de estudo, em coordenadas geográficas; (b) Modelo digital de elevação elaborado a partir de imagem ASTER, com resolução de 30 m; e crescimento demográfico do município de Iraquara para os anos de 1986, 2006 e 2016, confeccionado a partir de imagens do satélite *Landsat*.

Geologicamente, a área está inserida no panorama central do Estado da Bahia, tendo como modelo evolutivo um padrão estrutural do tipo aulacógeno (Souza *et al.* 1993) denominado de Cinturão de Dobramentos e Cavalgamentos da Chapada Diamantina Oriental. Nessa região, afloram unidades litoestratigráficas mesoproterozoicas predominantemente de natureza siliciclástica representadas, da base para o topo, pelas formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu compondo o Grupo Chapada Diamantina e uma espessa sequência carbonático-pelítica de idade neoproterozoica que compõe o Grupo Una (Supergrupo São Francisco). Recobrando as rochas, afloram coberturas detríticas cenozoicas relacionadas com os sucessivos ciclos de erosão que esculpiram o relevo (Misi 1979, Bonfim *et al.* 1985, Pedreira *et al.* 1987, Souza *et al.* 1993, Souza *et al.* 2002, Pedreira 2004).

No que diz respeito à geomorfologia, o município de Iraquara pode ser dividido em dois domínios: i) o primeiro corresponde à região serrana, onde afloram os metassedimentos do

Grupo Chapada Diamantina, com topografia variando de 800 a 1200 m e declividade entre 8 e 30%; ii) a segunda unidade do relevo consiste no planalto cárstico, onde predominam feições morfológicas constituídas por rampas suavemente inclinadas e onduladas, com declividades variando entre 0 e 12% (Fig. 1b).

As depressões cársticas correspondem a um conjunto de dolinas ou uvalas. Estas geoformas se concentram em faixas com orientação preferencial NW – SE e, subordinadamente, N – S, ocupando 1,64% da área total do município. As depressões cársticas na região podem ser classificadas em dois grupos (Cruz Junior 1998): i) dolinas de colapso, que correspondem à depressões fechadas, com perfil escarpado; e ii) dolinas de *suffosion* (Ford e Williams 1989), representadas por depressões com perfis suaves, associadas a subsidência lenta causada pela remoção e infiltração de material detrítico (Fig. 2).



**Fig. 2.** (a) dolina de colapso associada, possivelmente, à superexploração da água subterrânea e utilização no cultivo de tomate, detalhe em a1; em (b) dolina de *suffosion* (Ford e Williams 2007).

### 3. Materiais e métodos

Para a confecção do modelo de risco geotécnico associado a abatimentos no município de Iraquara foram utilizados três conjuntos de dados. Estes incluem dados geológicos, mapa de fenômenos cársticos e análise visual em campo. A partir desses dados foram elaborados mapas

litológico, de densidade de lineamentos, e de densidade de feições carsticas. Posteriormente, esses mapas foram integrados utilizando uma álgebra de mapas denominada de índice de risco geotécnico. Esses métodos serão descritos sequencialmente.

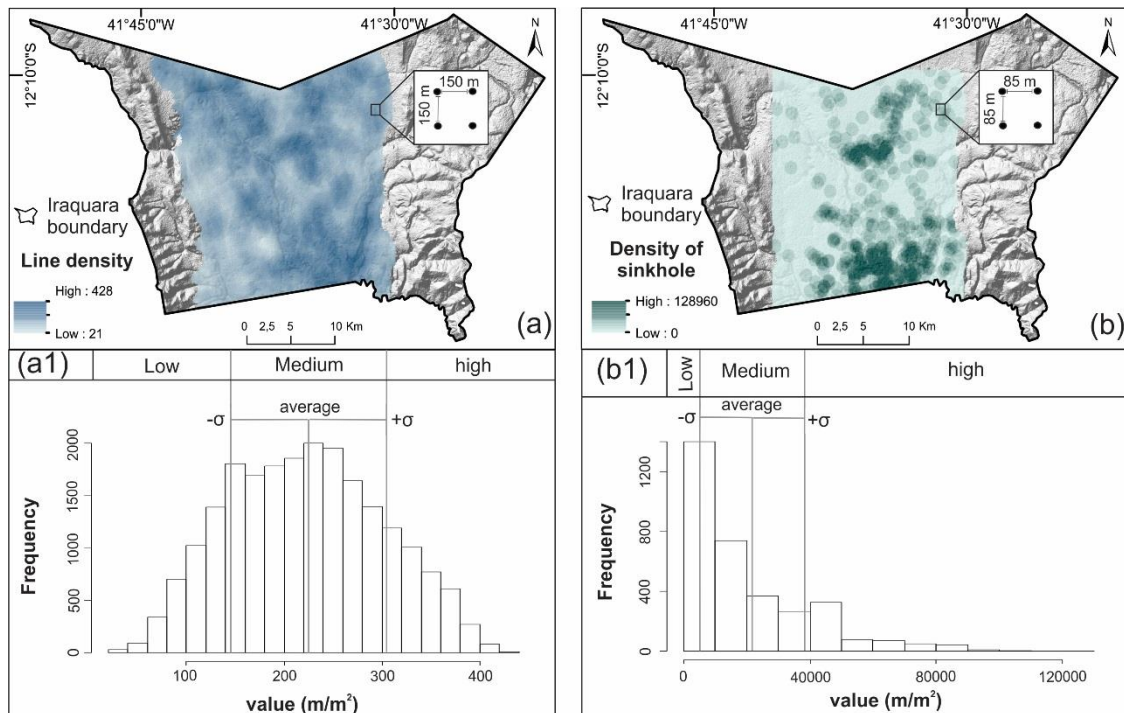
### 3.1 Confecção de mapas base

Os dados geológicos consistem em: i) mapa geológico (1:100:000), confeccionado a partir do banco de dados do IBGE/SEI (2003); e ii) mapa de densidade de lineamentos (Fig. 3a), gerado a partir da ferramenta *Line Density* do programa ArcMap 10.1. Os lineamentos foram traçados por meio de cristas alinhadas, fundos de vale e drenagens, de acordo com a interpretação de imagens de relevo sombreado geradas com base em azimutes 0°, 90°, 180° e 270°.

Com o intuito de construir um amplo inventário cartográfico, foi elaborado um mapa de fenômenos cársticos. Esse consiste na extração de geoformas partir da análise de fotografias aéreas na escala 1:60.000. Posteriormente, as fotografias áreas foram escaneadas e vetorizadas no *software* ArcMap 10.1. O mapa de densidade de dolinas consiste na interpolação de pontos centrais (unidade de dolina) na ferramenta *Density* do software ArcMap 10.1 (Fig. 3b).

Com a finalidade de definir padrões em relação aos índices de dolinas e de fraturamento, foi realizado um estudo de distribuição de classes. Essa análise consiste na extração do valor dos índices supracitados a partir de uma malha amostral equidistante em 150 m para a densidade de lineamentos (Fig. 3 a1) e 85 m para o mapa de densidade de dolinas (Fig. 3 b1). Esses valores consistem na extração de pontos a partir da menor célula da imagem raster (pixel), com auxílio da ferramenta *Conversions Tools* do ArcMap 10.1. Os índices foram divididos em três classes: i) baixo – para os valores abaixo da média menos o desvio padrão ( $\sigma$ ); ii) alto para os valores acima da média mais o desvio padrão; e iii) médio – valores entre o intervalo ii e iii (Fig. 3).





**Fig. 3.** (a) Mapa de densidade de fotolineamentos extraído a partir de imagem RASTER; (a1) Histograma de distribuição de classes quanto à densidade de lineamentos e sua relação com o grau de risco geotécnico; (b) Mapa de densidade de dolina, confeccionado a partir de fotografias aéreas na escala 1:60.000; e (b1) Histograma de distribuição de classes quanto à densidade de dolinas e sua relação com o grau de risco geotécnico.

### 3.2 Modelo de risco geotécnico

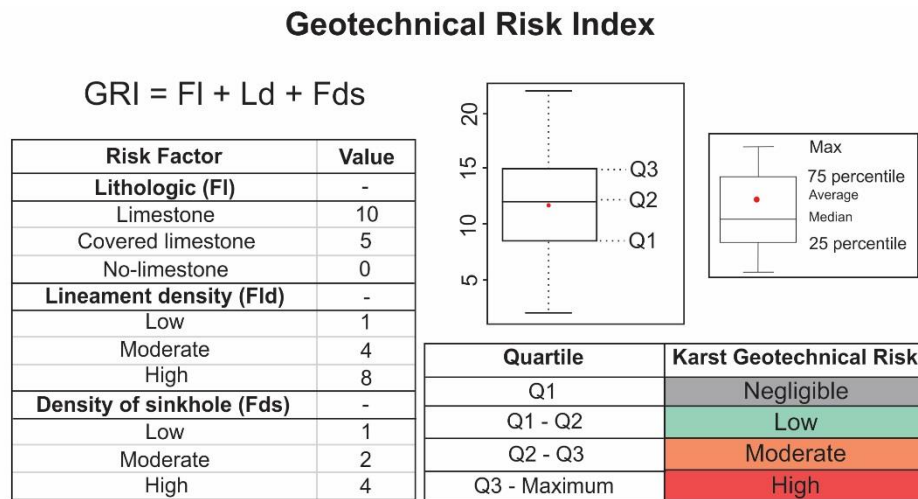
O propósito desse modelo foi dividir a área de estudo em sub-regiões com diferentes riscos de colapso ou de subsidência. Usando um modelo elaborado a partir de Hu et al. (2011), Galve et al. (2007), Galvão et al. (2015) e Siska et al. (2016), três fatores foram utilizados na confecção do modelo de risco geotécnico: i) litológico; ii) densidade de fraturamento; e iii) densidade de dolinas. Os fatores de risco geotécnico e seus atributos estão sumarizados na Fig. 4, de acordo com seu grau de influência sobre o risco geotécnico. O Índice de Risco Geotécnico (IRG) consiste na soma dos fatores supracitados (Fig. 4).

O fator de risco litológico foi baseado nas rochas mapeadas em campo e suas relações com a quantidade de ocorrência de dolinas por quilometro quadrado. Com isso, foram divididas três categorias quanto ao fator de risco litológico: i) áreas onde as rochas carbonáticas da Formação Salitre são aflorantes com valor de risco 10; ii) para rochas carbonáticas recobertas por sedimentos inconsolidados, foi atribuída um valor na ordem de 5; por fim iii) valor de risco geotécnico 0 para rochas siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina e da Formação Bebedouro.

Esse mesmo princípio foi utilizado para quantificar o fator de risco geotécnico quanto à densidade de lineamentos. Assim, foram categorizadas três classes quanto ao fator de risco

densidade de fraturamento (Fig. 4). O fator de risco geotécnico associado à densidade de dolinas foi sumarizado em três categorias: alto, médio e baixo, atribuindo, respectivamente, os valores 1, 2 e 4. Esse fator reflete o grau de instabilidade da superfície do terreno, podendo, ainda, favorecer a coalescência dessas feições cársticas superficiais, formando uvalas em locais onde a quantidade de dolinas por área é elevada.

Os valores calculados a partir da IRG (Fig. 4) resultaram em grandezas adimensionais. Com a finalidade de avaliar a distribuição empírica dos dados e estabelecer intervalos de riscos geotécnicos, foi realizada uma análise estatística descritiva, a partir de todas as combinações possíveis do grau de risco geotécnico, calculados a partir da equação GRI (Fig. 4). A partir de uma planilha Excel, foi elaborada a divisão de seus quartis, a partir dos possíveis valores de IRG. Com isso, foram definidas relações entre os quartis calculados e o índice de risco geotécnico associado ao colapso ou subsidência do modelado cárstico.



**Fig. 4.** Índice de Risco Geotécnico (IRG), calculado a partir dos fatores litológico, densidade de lineamentos e densidade de dolinas. O *box plot* exemplifica o método utilizado para a separação do grau de risco geotécnico: negligenciável para o primeiro quartil (Q1); baixo entre Q1 – Q2; moderado entre Q2 – Q3; e alto para os valores acima de Q3.

#### 4. Resultados

Os resultados são compostos de mapa geológico, fatores associados as colapsos e subsidências e índice de risco geotécnico.

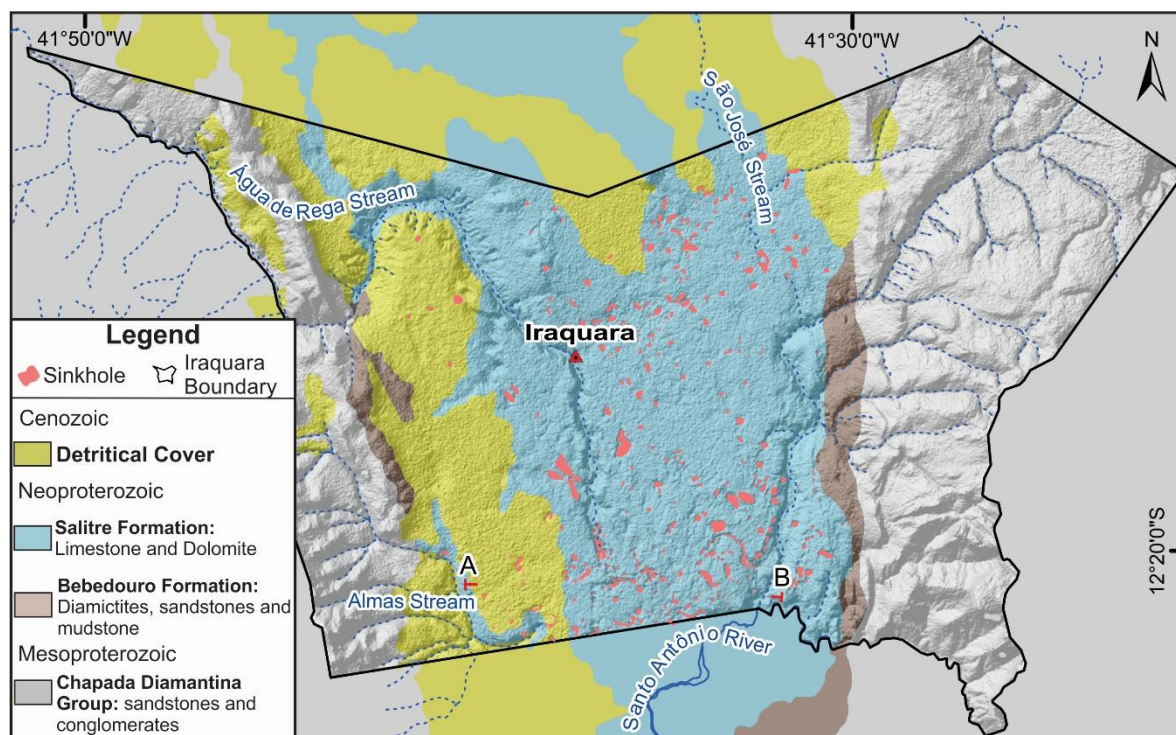
## 4.1 Litologia

Do ponto de vista litológico, a área de estudo pode ser subdividida em três domínios: i) domínio das rochas siliciclásticas; ii) domínio das rochas carbonáticas; e iii) domínio das coberturas cenozoicas. O domínio das rochas siliciclásticas corresponde a Formação Bebedouro e ao Grupo Chapada Diamantina, distribuídas nas extremidades W e E (Fig. 5), ocupando aproximadamente 47,9% da área do município (IBGE/SEI 2013).

O domínio das rochas carbonáticas é representado pela unidade Nova América e Jussara, constituintes da Formação Salitre. Essa litologia localiza-se na porção central da área do município de Iraquara e ocupa aproximadamente 36,6% de sua área. A unidade Nova América é constituída por calcissiltito, dololutito, dolarenito e lamito algal (Fig. 6), depositados em ambiente de inter-maré a submaré com exposição periódica. Já a formação Jussara é formada por calcarenitos oolíticos, por vezes oncolítico, depositados em ambiente de Sub-maré e localmente inter-maré a supra-maré (Pedreira 2004)

Petrograficamente, as rochas carbonáticas da região possuem porosidade primária extremamente baixa; quando existente, está associada ao processo de dolomitização da calcita. A permeabilidade eficaz do aquífero, limita-se a porosidade secundária (falhas e fraturas) e formação de uma porosidade terciária (cavidades) (White 1999; Worthington et al. 2000; White 2002).

Recobrando essas unidades estão os sedimentos inconsolidados de idade cenozoica. Essa cobertura está distribuída de forma indiscriminada na área do município, ocupando aproximadamente 19,6 % (IBGE/SEI 2013).



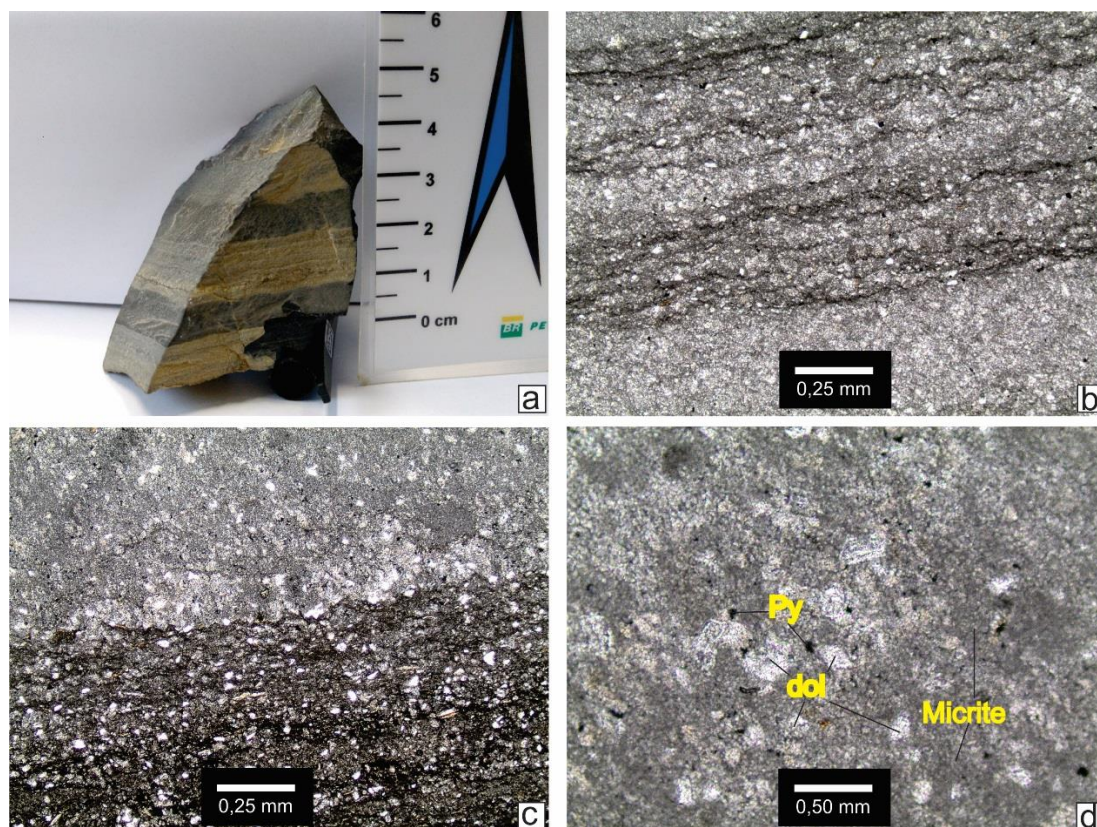
**Fig. 5.** Mapa geológico do município de Iraquara. As rochas siliciclásticas da Formação Bebedouro e do Grupo Chapada Diamantina ocorrem nas porções W e E no município; as rochas carbonáticas da Formação Salitre afloram na porção central da área; as coberturas detríticas cenozoica ocorrem de forma indiscriminada (IBGE/SEI 2013).

#### 4.2 Fator de risco geotécnico

O fator de risco geotécnico associado à litologia (Fig. 7a) foi dividido a partir do número de dolinas por unidade de área ( $\text{km}^2$ ), dos litotipos exemplificados na Fig. 5. Onde, as rochas carbonáticas da Formação Salitre são aflorantes, ocorrem 1,13 unidade de dolina por quilometro quadrado ( $\text{km}^2$ ). Entretanto, quando repousam sob unidades de sedimentos inconsolidados, ocorrem uma queda considerável na quantidade de dolina por  $\text{km}^2$ , seis vezes menor quando comparada ao carste exposto. Sobre as rochas siliciclásticas do Grupo Chapada Diamantina e da Formação Bebedouro não foram mapeadas dolinas.

Os fotolineamentos consistem, possivelmente, em foliações, fraturas, falhas e interações de planos de estratificação com a superfície. Vale salientar que essas feições do relevo podem ser parcialmente mascaradas pela presença de coberturas sedimentares (Chema e Islan 1994). O mapa de densidade de lineamento (Fig. 7b) demonstrou que esses estão dispostos de forma heterogênea na área do município. Entretanto, em sua porção sul, encontra-se a maior unidade de alta densidade de fotolineamentos.



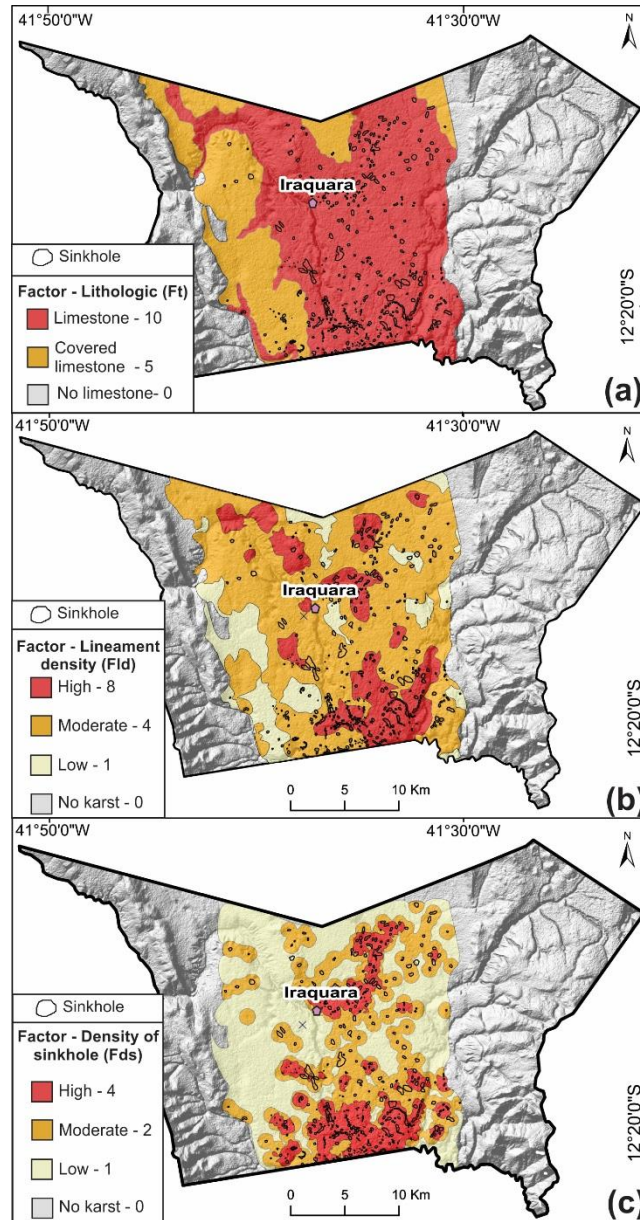


**Fig. 6.** (a) Lamito criptoalgal da Formação Nova América, depositado em ambiente de supra-maré; (b) lâmina petrográfica, em luz plana e objetiva de 10x, evidenciando níveis de dissolução da rocha (em preto) enriquecidos em matéria orgânica (MO); (c) lamito algal dolomitizado, com detalhe na zona de contato entre o lamito rico em MO sobreposto pela lama carbonática; (d) detalhe para a dolomitização da micrita, em luz plana e objetiva de 20x.

A unidade de baixa densidade de lineamento ocupa 17,9% da área susceptível ao abaulamento da superfície. Nessa região, ocorre 0,35 unidade de dolina por  $\text{km}^2$ . Já a unidade de moderada densidade de fotolineamentos ocupa, aproximadamente, 63,8% da área sujeita a colapso e subsidência do terreno, onde ocorrem 0,67 unidade dolina por  $\text{km}^2$ . Por fim, a unidade de alta densidade de fotolineamento possui em torno de 18,3% da área passível ao colapso e subsidência, onde foram mapeadas 2,4 unidades de dolinas por  $\text{km}^2$  (Fig. 7b). Essa análise permitiu inferir, para a região, uma correlação direta entre a densidade de fotolineamentos e a presença de dolinas.

O fator de risco geológico associado a densidade de dolinas (Fig. 7c), demonstrou duas regiões de maior concentração de dolinas no município de Iraquara. A primeira em sua porção centro-sul, e a segunda na porção centro norte, onde está localizada parte da sede municipal. Na maioria das áreas cársticas, a evolução do sistema está ligada diretamente aos processos superficiais, sendo a caracterização do exocarste um dos principais recursos para a compreensão do carste subterrâneo (Ford e Williams 2007). Devido a isso, uma maior trama de dolinas em superfície sugere um carste subterrâneo mais evoluído e, por conseguinte, uma maior

susceptibilidade ao colapso e subsidência nessas áreas (Zhou *et al.* 2003, Gao *et al.* 2005, Kemerly 2006).

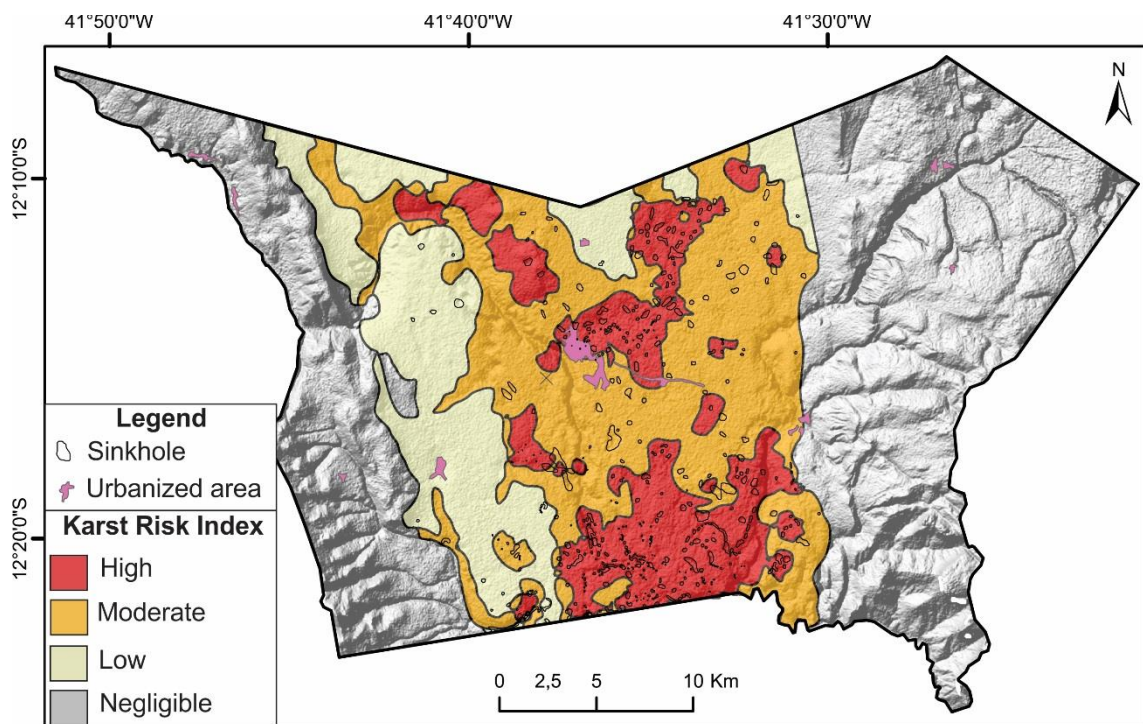


**Fig. 7.** (a) Fator de risco geotécnico associado as litologias presentes na região, sumarizados em três classes: rochas carbonáticas, rochas carbonáticas cobertas por sedimentos inconsolidados e rochas não carbonáticas; (b) distribuição de classes do fator risco geotécnico associado a densidade de lineamentos; e (c) Distribuição de classes do fator risco geotécnico associado a distribuição espacial das dolinas. Ressalta-se que regiões com elevado índice de lineamentos coincide com as regiões com elevado índices de dolineamento.



### 4.3 Índice de Risco Geotécnico

O índice de risco geotécnico (Fig. 8) foi definido a partir da soma dos fatores de risco geológico (Fig. 7a), densidade de lineamentos (Fig. 7b) e densidade de dolinas (Fig. 7c). A área de elevado risco geotécnico (em vermelho) ocupa, aproximadamente, 13% da área do município, ocorrendo 2,62 dolinas por km<sup>2</sup>. A porção de moderado risco geotécnico (em laranja) ocorre em 16,7% da área do município, com 0,775 dolinas por km<sup>2</sup>. Já a região de baixo risco geotécnico (em amarelo) abrange 17,4% do município de Iraquara, onde ocorrem 0,15 dolinas por km<sup>2</sup>. Por fim, a porção cinza do mapa corresponde as rochas siliciclásticas da Grupo Chapada Diamantina e da Formação Bebedouro, onde não ocorrem dolinas.



**Fig. 8.** Mapa demonstrando a distribuição de classes do modelo de risco geotécnico, dolinas e a área urbanizada do município. A sede municipal, localizada na porção central do mapa, encontra-se sobre unidades de elevado a moderado risco associado ao colapso e subsidência. Entretanto os povoados do município de Iraquara encontram-se em regiões de baixo ou nenhum risco geotécnico.

### 5. Discussões

Os resultados desse estudo forneceram uma expressiva perspectiva a respeito da distribuição de colapso e subsidência em modelados cársticos, bem como gerou uma melhor compreensão de suas causas no município de Iraquara. Esta discussão fornecerá uma interpretação a respeito da nucleação e desenvolvimentos de dolinas.

O modelo de risco geotécnico aqui reportado não corresponde à possibilidade de colapso e subsidência em termos quantitativos. Este, indica áreas mais susceptíveis a serem afetadas pelo processo de abatimento do relevo. Esse conhecimento consiste em uma importante ferramenta na gestão do uso e ocupação do solo na região, onde é possível sugerir locais com menor suscetibilidade ao abaulamento da superfície e consequente maior potencial de utilização.

Segundo Salles (2017) a superfície potenciométrica na região sugere um fluxo acompanhado a topografia local, com direção preferencial NW-SE. No mapa proposto por esse autor não foram observadas anomalias na superfície potenciométrica, que possam estar associadas ao processo de subsidência e colapso no município de Iraquara. Contudo, esse mapa levou em consideração apenas os poços oficialmente cadastrados junto ao banco de dados da CERB e pode não testemunhar a real situação da região. Observações de campo demonstraram que o processo de subsidência do terreno pode estar, localmente, associado a super exploração da água subterrânea (Fig. 2). Com isso, sugere-se que estudos futuros levem em consideração a exploração da água subterrânea, utilizando dados que revelem a real conjuntura da região.

Os resultados mostraram, que as áreas com elevado índice de vulnerabilidade geotécnica correspondem a regiões onde as rochas carbonáticas são aflorantes e de elevada densidade de fotoneamentos. Estes, consistem da intercessão de falhas, fraturas e acamadamento geral das rochas com a superfície do terreno – interpretados como locais de descontinuidade do maciço rochoso. O favorecimento da presença de dolinas em regiões de maior densidade de fotoneamentos ocorre, possivelmente, associada a uma maior permeabilidade da rocha. Devido a isso, a percolação da água ácida autigênica é favorecida nessas regiões, acelerando o processo de carstificação da rocha.

Uma maior permeabilidade da rocha pode ainda facilitar, ao longo do tempo, a lixiviação e transporte do material não coeso sobre a rocha, gradualmente, para dentro dos condutos cársticos, formando depressões (dolina de *suffosion*) sobre o modelado. Esse processo ocorre de forma gradual e lenta, podendo ser acelerados a partir da interferência antrópica. Todavia, podem, mesmo quando ocorrem de forma lenta e gradual, gerar inúmeras perdas de matéria, assim como observado nos relatos de Silva (1998) e Santos (2008).

Foi observada uma estreita relação entre os fatores de índice geotécnico associado a densidade de dolinas (Fig. 7c) e densidade de fotoneamentos (Fig. 7b). Locais com alta densidade de dolinas podem ser atribuídos a regiões onde o cárste subterrâneo é mais evoluído

(Gao *et al.* 2005, Kemerly 2006) e conseqüentemente ocorrem uma maior porcentagem de espaços vazios (porosidade terciária) na rocha. Esse fato corrobora com importância da densidade de fotolineamentos na evolução do sistema cárstico e no do aumento de risco geotécnico associado ao colapso e subsidência em áreas cársticas.

Os autores acreditam que os possíveis fatores associados a nucleação abatimentos da superfície, no município de Iraquara, estão relacionados com: 1) a dissolução da rocha carbonática; 2) presença de cobertura sedimentar sobre rochas carbonáticas; 3) grau de evolução do relevo cárstico; e 4) ocorrência de descontinuidades em subsuperfície; podendo ainda estar, localmente, associada a exploração da água subterrânea. O risco associado a retirada da água subterrânea não é estático, uma má gestão dos recursos hídricos pode agravar o risco geotécnico, associado a formação ou evolução de dolinas.

Essa análise integrada e de baixo custo produziu resultados satisfatório para o entendimento e espacialização de colapsos e subsidências no município de Iraquara, podendo ser extrapolado para outras regiões cársticas onde a exploração da água subterrânea é baixa. As desvantagens dessa abordagem consistem em não levar em consideração a relação da nucleação de dolinas com a exploração da água subterrânea e com a espessura do solo sobre as rochas carbonáticas – não somente a relação entre as coberturas detríticas lateríticas cenozoica.

## **6. Conclusão**

A partir dos mecanismos de colapsos no município de Iraquara, foram estabelecidos fatores que conotam instabilidade ao sistema: geologia, densidade de lineamentos e densidade de dolinas. Esses fatores mostraram-se eficientes no que diz respeito ao entendimento e especialização de áreas de risco com diferente susceptibilidade a colapsos e subsidências do terreno. Essas informações devem ser utilizadas como base para um planejamento urbano preventivo, indicando zonas onde a implantação de medidas corretivas é de maior prioridade.

O fenômeno geotécnico é resultado da combinação de diversos fatores (geológicos, estruturais, características do carste, circulação e uso da água subterrânea), tornando difícil prever com segurança onde e quando irão ocorrer. Entretanto, quando as relações entre esses processos e seus fatores de influência são compreendidas, torna-se possível delimitar zonas de diferentes susceptibilidades ao colapso e subsidência de dolinas.

A partir do estudo de imagens de satélite, observa-se que o *boom* demográfico no município de Iraquara é recente e se dá, possivelmente, no ano de 2006. Um aumento na exploração dos recursos hídricos subterrâneos na região pode, localmente, acelerar os processos

de colapso de subsidência do terreno. Sendo assim, é imprescindível a elaboração de um plano de manejo para a utilização da água subterrânea.

Compreendidos os mecanismos associados ao colapso e subsidência no município de Iraquara, algumas medidas podem ser tomadas para evitar danos as propriedades e perda de vidas: 1) evitar novas construções em áreas de elevado risco geotécnico; 2) controlar o número de poços tubulares perfurados nas áreas de moderado e elevado risco geotécnico; 3) controlar a irrigação em larga escala, com intuito de diminuir a entrada d'água extra no sistema; e por fim 4) promover oficinas educativas, afim de orientar a população dos riscos associados aos colapso e subsidência e como agir em eventos catastróficos.

Estimativas de probabilidade de ocorrências de dolinas fornecidas por modelos de risco geotécnico devem ser utilizadas com o intuito de avaliação de risco e análise de medidas mitigadoras, bem como deve ser levado em consideração num plano de manejo para uso e ocupação da terra nos municípios.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. Ao professor Cícero Paixão, que gentilmente cedeu as lâminas petrográficas. Ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente – NEHMA e seus participantes. Por fim, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico – CNPq – pelo suporte no desenvolvimento das pesquisas.

### **Referências**

- Auler A S, Farrant AR (1996). A brief introduction to karst and caves in Brazil. Univer. Britl Speloca. Soc. n 20:187-200.
- Bonfim LFC, Rocha AJD, Pedreira AJ, Morais Filho JC, Guimarães JT, Tesch NA (1985) Projeto Bacia de Irecê. Relatório final. CPRM. Três volumes. Contrato CPRM/SME/CPM.
- CECAV- Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Available in [www.icmbio.gov.br/cecav](http://www.icmbio.gov.br/cecav). Accessed 09/02/2017.
- Cheema TJ, Islan MR (1994). Comparison of cave passage ways with fracture traces and joints in the black hills region of South Dakota. The National Speleological Society Bulletin 56:96-103.

- Cooper AH, Gutiérrez F (2013). Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues and planning. *Treatise on Geomorphology – Karst Geomorphology* 6: 451–462.
- Elhatip H (1995). The influence of karst features on environmental studies in Turkey. *Environmental Geology* 31(1/2):27-33.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). ArcGIS for Desktop, versão. 10.4. Redlands: ESRI, 2016.
- Ford D.C., Williams P.W (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Geography. Second Edition, p. 562.
- Galvão P; Halihan T; Hirata R (2015). Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal* 22:1499-153.
- Galve JP, Gutiérrez F, Lucha P, Guerrero J, Bonachea J, Remondo J, Cendrero A (2009a). Probabilistic sinkhole modeling for hazard assessment. *Earth Surface Processes and Landforms* 34:437-452.
- Galve JP, Gutiérrez F, Remondo J, Bonachea J, Lucha P, Cendrero A (2009b) Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporate karst (NE Spain). *Geomorphology* 11:160-172.
- Galve JP, Remondo J, Gutiérrez F (2011). Improving sinkhole hazard models incorporating magnitude–frequency relationships and nearest neighbor analysis. *Geomorphology* 134:157–170.
- Gao Y, Alexander EC, Barnes, RJ (2005). Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environ. Geol.* 47:1083–1098.
- Goldsheider N, Drew D (2007) *Methods in karst hydrology*. Taylor & Francis Group, London, U.K. 264 p.
- Gutiérrez F, Guerrero J, Lucha P, (2008). Quantitative sinkhole hazard assessment: A case study from the Ebro Valley evaporate alluvial karst (NE Spain). *Nat. Hazards* 45:211–233.
- Gutiérrez F, Parise M, De Waele J, Jourde H (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews* 138:61-88.
- He K, Liu C, Wang S (2003). Karst collapse related to over-pumping and a criterion for its stability. *Environmental Geology* 43:720-724.
- Hu RL, Yeung MR, Lee CF, Wang SJ, Xiang JX (2001). Regional risk assessment of karst collapse in Tangshan, China. *Environmental Geology* 40:1377-1389.
- Huggett RJ (2007). *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge Fundamentals of Physical Geography, second edition p. 483.
- IBGE/SEI (2013). *Cartas Plani-Altimétricas do Estado da Bahia*. Escala 1:100.000.

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available in <http://www.ibge.gov.br/home/> Accessed 08/02/2017.

Kemmerly PR (2006). Modeling doline populations with logistic growth functions. *Earth Surf. Process. Landf.* 32:587–601.

Keqiang H, Guangming Y, Yaoru L (2009). Paleo-Karst collapse pillars in northern China and their damage to the geological environmental. *Environ Geol* 58:1029-1040.

Lei M, Jiang X, Li I (2001). New advances of karst collapse research in China. *Geotechnical and Environmental Applications of karst Geology and Hydrology*, Balkema, Lisse, p. 51-145.

Misi A (1979). Grupo Bambuí no Estado da Bahia. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia*. Salvador SME/CPRM. V1:119-154.

Pedreira AJ (2004). O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo.

Pedreira AJ, Rocha AJD, Costa IVG, Moraes Filho JC (1987). Projeto Bacia de Irecê II. Relatório final. Salvador: CPRM.

Sallun Filho W (2012). Subsidência e colapso em terrenos cársticos. *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. Instituto Geológico de São Paulo.

Santos AR (2008). Terrenos Cárstico: Áreas de risco geológico para a Engenharia e para o meio ambiente. Available in <http://notivias.ambientebrasil.com.br>. Accessed 13/12/2016

Silva AB (1998). Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Água Subterrânea* 12:57-66.

Siska PP, Goovaers P, Hung IK (2016). Evaluating susceptibility of Karst dolines (sinkholes) for collapses in Sango, Tennessee, USA. *Progress in Physical Geography* 40:579-597.

Souza SL, Brito PCR, Silva RWS (1993). Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM.

Souza SL, Brito PCR, Silva RWS (1993). Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia (Série Arquivos Abertos 2). Salvador: CBPM.

Souza SL, Toledo LAA, Brito PCR, Fróes RJB; Silva RWS (2002). Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, v. 1.

US Environmental Protection Agency (1994). Handbook: ground water and wellhead protection. EPA/625/R-94/001, US EPA, Washington, DC.

Zhou W (2006). Drainage and flooding in karst terranes. *Environ Geol* DOI 10.1007/s00254-006-0365-3.



Zhou W, Beck BF, Adams A (2003). Application of matrix analysis in delineating sinkhole risk areas along highway (I-70 near Frederick, Maryland). *Environ. Geol.* 44:834–842.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

Este capítulo fornece as conclusões gerais e resultados mais relevantes desse estudo. Para melhor entendimento, esse item será separado em subtópicos.

#### 6.1 Aspectos morfológicos e evolução do relevo

A porção meridional da Bacia de Irecê apresenta uma morfologia composta por rampas suaves, de baixa declividade e topografia variando de 640 a 880 metros. As dolinas consistem nas principais feições do exocarste, orientadas em faixas preferencialmente na direção NW – SE e subordinadamente N – S. A dissolução da rocha carbonática é, possivelmente, oriunda da coalescência de dois processos de carstificação. À carstificação epigênica, que tende a acentuar-se até a profundidade de 60 m, levando em consideração os dados de capacidade específica em poços tubulares. Esse processo, provavelmente, é responsável por uma maior conectividade hidráulica no intervalo de classe de poços tubulares até a profundidade supramencionada. Entretanto, os dados aqui analisados indicam valores mais elevados de capacidade específica no intervalo de classes de profundidades entre 91 e 120 m, sugerindo a formação de cavidades na zona saturada do aquífero. Essa maior conectividade hidráulica nesse intervalo de classe pode estar associada a uma carstificação hipogênica, causada pela hidrólise de sulfetos disseminados na rocha.

Petrograficamente, as rochas da Formação Nova América são classificadas como lamito algal, constituído predominantemente por micrita, por vezes dolomitizada. A pirita encontra-se dispersa na matriz micrítica. A carstificação hipogênica ocorre na área de estudo, possivelmente, associada a hidrólise desse sulfeto disperso no maciço rochoso. A estequiometria dessa reação de dissolução, libera no meio aquoso ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), altamente corrosivo ao sistema.

#### 6.2 Capacidade Específica e zonas mais produtivas do aquífero

A compreensão dos aspectos morfológicos que condicionam a hidrogeológica é uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneo em modelados cársticos. Nesse trabalho são reconhecidas duas zonas de maior produtividade no aquífero: (i) até 60 metros de profundidade; e (ii) em profundidade variando entre 91 – 120 metros. Outro fator

importante a destacar é que poços perfurados em baixas altitudes tendem a ser mais produtivos que poços perfurados em locais mais elevados.

Uma correlação entre as feições superficiais do terreno e dados de capacidade específica ( $Sc$ ) em poços tubulares, apresentaram respostas distintas, associadas a densidade de lineamentos e de dolinas. Observa-se uma baixa correlação dos dados de  $Sc$  em função do mapa de densidade de lineamentos. Entretanto, a densidade de dolinas apresenta moderada influência nos valores de  $Sc$ . Assim, é possível constatar que o arranjo geométrico superficial interfere de forma significativa na capacidade específica de poços tubulares, quando levado em consideração a ocorrência de dolinas.

### 6.3 Hidrogeologia e Isótopos estáveis

O aquífero carbonático Proterozoico Salitre apresenta superfície piezométrica acompanhando a topografia local, com fluxo subterrâneo preferencial em direção a calha do rio Santo Antônio, com evolução hidroquímica de águas cloretada cálcica para bicarbonatada cálcica. Entretanto, esse fluxo pode ter pouca, ou nenhuma, continuidade lateral, no que tange a evolução hidrogeoquímica das águas. Sendo limitado preferencialmente em três sistemas cársticos distintos, a saber: (i) Sistema riacho das Almas – Cão - Talhão; (ii) Sistema riacho Água de Rega – Lapa Doce; e (iii) Sistema riacho São José – Gruta José Antônio – Pratinha, assim como proposto em Laureano (2014) a partir de análises morfométricas.

A partir da técnica de agrupamento, denominada análise de componentes principais (ACP), é possível individualizar três grupos para as águas analisadas. O primeiro grupo corresponde as águas naturais, sem degradação de sua qualidade por atividades antrópicas. Já segundo grupo remete a águas naturais de um sistema cárstico isolado, com assinatura isotópica distinta ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta^2H$  e  $\delta^{13}C$ ). Por fim, o terceiro grupo é relacionado a águas contaminadas por atividades antrópicas recentes, como despejo de lixo ou esgoto.

Na região, a evaporação na zona vadosa do aquífero, não consiste em um importante mecanismo de salinização da água subterrânea, sendo essa, decorrente unicamente da interação água-rocha. Isso ocorre devido a rápida infiltração da água no solo, facilitada pelo elevado número de dolinas no modelado – na ordem de 1,03 unidade de dolina por quilômetro quadrado. O modelamento geoquímico demonstra que as presenças do nitrato (em baixas concentrações), de cloreto, sódio e sulfato, podem ser atribuídas a esse mesmo processo de salinização – decorrente da dissolução da rocha carbonática.

O uso integrado da geoquímica e de métodos isotópicos ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), em aquíferos carbonáticos Proterozoicos, corresponde a uma importante ferramenta para a modelagem e entendimento dos processos de salinização da água subterrânea. Acarretando em um método auxiliar de avaliação e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

#### **6.4 Análise de risco geológico**

Através da discussão sobre os mecanismos de abtimento da superfície no município de Iraquara, foram considerados três fatores de instabilidade no sistema, a saber: fator geologia, fator densidade de lineamentos, e fator densidade de dolinas, sumarizados a partir do índice de risco geotécnico. Esse modelo propôs zonas com diferente susceptibilidade ao colapso e subsidência na área de estudo.

O entendimento para os colapsos e subsidências, incluem dados geológicos, estruturais, observações de campo, características do carste, circulação e uso da água subterrânea. Sendo assim, esse fenômeno geotécnico é resultado da combinação de diversos fatores, tornando difícil prever com segurança onde e quando irão ocorrer. Entretanto, quando as relações entre esses processos e seus fatores de influência são compreendidas torna-se possível delimitar zonas de diferentes susceptibilidades ao colapso e subsidência de dolinas.

#### **6.5 Recomendações**

Essa dissertação de mestrado, de ponto de vista da hidrogeologia, geomorfologia e análise de risco geotécnico, esclareceu importantes questões em escala local. As ferramentas aqui utilizadas mostram-se satisfatórias na compreensão dos processos de salinização, delimitação do fluxo subterrâneo e de sistemas cársticos, análise de risco geológico e zonas mais produtivas no aquífero. Relevos cársticos são naturalmente mais susceptíveis à contaminação e a riscos geológicos, quando comparados a maioria dos outros sistemas naturais. Devido a isso, as informações aqui levantadas devem ser utilizadas na gestão dos recursos hídricos e no uso e ocupação da do solo.

Estimativas de probabilidade de ocorrências de dolinas fornecidas por modelos de risco geotécnico devem ser utilizadas com o intuito de avaliação de risco e análise de medidas mitigadoras. O modelo aqui reportado não tem por finalidade delimitar apenas áreas mais propensas a ocorrência de dolinas, mas também sugerir regiões com menor suscetibilidade a

formação das mesmas. Essas informações devem ser utilizadas como base para um planejamento urbano preventivo, indicando também zonas onde a implementação de medidas corretivas é de maior prioridade.

Por fim, sugere-se uma análise mais aprofundada no que diz respeito ao risco geotécnico no município de Iraquara. Levando em consideração um mapeamento geológico em escala de semi-detalle (1:25.000), dados de níveis piezométricos atualizados e a utilização de informações geofísicas. .

## APÊNDICE A

Justificativa da participação dos co-autores do artigo “Influência da Evolução Morfológica nos Aspectos Hidrogeológicos de Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Porção Central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil ”.

Luiz Rogério Bastos Leal – orientador.

Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira – co-orientador.

Fernando Verassani Laureano – revisor do artigo, além de participar de forma indispensável da etapa de campo.

Thiago dos Santos Gonçalves – participou de forma significativa na confecção do artigo.

## APÊNDICE B

Justificativa da participação dos co-autores do artigo “Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) Aplicadas no Entendimento do Processo de Salinização da água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozoicos: Evidencia do Semiárido do Nordeste Brasileiro”.

Luiz Rogério Bastos Leal – orientador.

Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira – co-orientador.

Fernando Verassani Laureano – revisor do artigo, além de participar de forma indispensável da etapa de campo.

Sergio Augusto de Moraes Nascimento – revisor do artigo.

Maria do Rosário Zucchi – revisora do artigo.

## APÊNDICE C

Justificativa da participação dos co-autores do artigo “Avaliação de risco geotécnico, associado ao colapso e subsidência em áreas cársticas, no município de Iraquara, Chapada Diamantina, Brasil”.

Luiz Rogério Bastos Leal – orientador.

Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira – co-orientador.

Fernando Verassani Laureano – revisor do artigo, além de participar de forma indispensável da etapa de campo.

Paulo Henrique Ferreira Galvão – desenvolveu, junto com o autor, a metodologia proposta no trabalho. Bem como, foi revisor do mesmo.

Carlos Gleidson da Purificação – colaborou na confecção dos SIGs e mapas.