



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

TESE DE DOUTORADO

HIDROGEOLOGIA E VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO
CÁRSTICO SALITRE NA BACIA UNA-UTINGA, BAHIA

RENILDA FÁTIMA GONÇALVES DE LIMA

SALVADOR

2019

HIDROGEOLOGIA E VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE NA BACIA UNA-UTINGA, BAHIA

Renilda Fátima Gonçalves de Lima

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Tese de Doutorado 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 Doutora em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2019

De Lima, Renilda Fátima Gonçalves
Hidrogeologia e Vulnerabilidade do Aquífero
Cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga, Bahia / Renilda
Fátima Gonçalves De Lima. -- Salvador, 2019.
173 f. : il

Orientador: Luiz Rogério Bastos Leal.
Tese (Doutorado - Geologia) -- Universidade
Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 2019.

1. COP. 2. PI. 3. Regiões Cársticas. 4. Índice
Cárstico. 5. Transmissividade. I. Bastos Leal, Luiz
Rogério. II. Título.

RENILDA FÁTIMA GONÇALVES DE LIMA

**“HIDROGEOLOGIA E VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO
CÁRSTICO SALITRE, NA BACIA UNA-UTINGA, BAHIA”**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutora em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 26/07/2019.


APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA:


Luiz Rogerio Bastos Leal


Cristovaldo Bispo dos Santos


Maria Rosário Zucchi


Maria da Conceição Rabelo Gomes


Sergio Augusto de Moraes Nascimento

Salvador – BA
2019

*“Obrigada aos amigos da terra e do céu,
ninguém faz nada sozinho!”*

- Fábio Jr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pai todo poderoso, que me deu forças e me guiou da melhor forma e de acordo com o meu merecimento, para a finalização deste trabalho.

À minha família e amigos pelo apoio, força e incentivo.

Agradeço ao Núcleo de Estudos Hidrológicos e do Meio Ambiente (NEHMA) em nome do meu Orientador Luiz Rogério Bastos Leal, por todo apoio e infraestrutura.

Aos meu colegas e amigos do NEHMA: Hailton Mello, Thiago Gonçalves, Carlos Purificação, Lucas Salles, Raissa Soares e Caio Leão, por todos os conselhos, ajuda e atenção no decorrer desse trabalho.

Ao Laboratório de Física Nuclear da UFBA, na pessoa de Tércio, que auxiliou nas análises isotópicas, e em especial a professora Maria Zucchi pela orientações e esclarecimentos nas interpretações isotópicas.

Ao Professor Sergio Nascimento e à professora Maria Conceição Rabelo, pelas orientações e esclarecimentos das interpretações hidroquímicas.

Agradecimento especial à Jean Carlos, Tarsila Carvalho e Clélia Nobre, companheiros fiéis e inseparáveis, de luta e de garra, muito grata e feliz por terem participado dessa minha jornada. Principalmente por aprendermos juntos, e ensinarmos um ao outro, como é bom ter alguém para contar!

RESUMO

A Bacia Una-Utinga, localizada na região central do estado da Bahia, abriga um importante sistema aquífero cárstico, correspondente à Formação Salitre, cujas rochas carbonáticas datam do Neoproterozoico e se dividem em Unidades Gabriel/Nova América e Nova América subunidade Lapão. Este trabalho visa apresentar uma caracterização hidrogeológica pioneira, com vistas nas questões de hidroquímica, isotópica, de transmissividade e vulnerabilidade do aquífero Salitre na área. Para a hidroquímica, utilizou-se dados de 35 amostras de poços coletados, analisados no LEPETRO/UFBA, e 17 amostras provenientes do banco de dados da CERB. A análise isotópica foi realizada em 40 amostras, no laboratório de Física Nuclear/UFBA. A transmissividade foi calculada pelo método de Theis e recalculada empiricamente por análise estatística. Para uma melhor resposta da cartografia de vulnerabilidade, utilizando os métodos COP e PI, foi necessário obter previamente um índice de carstificação da superfície. As águas foram classificadas nos seguintes fácies hidroquímicas: 58% de águas bicarbonatadas, 23% cloretadas, 13% mistas e 6% sulfatadas. Em termos de salinidade, 48% das águas dos poços são doces, 33% salobras e 19% salgadas. As amostras isotópicas apresentaram três classes, quando comparados $\delta^{18}\text{O}$ e STD mg/L. O padrão isotópico de δD e do $\delta^{18}\text{O}$ apresenta valores de: δD entre -2,1‰ e -46,3 ‰, e $-\delta^{18}\text{O}$ entre +2,85‰ e -8,28‰. Para transmissividade, foi gerado o mapa potenciométrico do aquífero, cujo fluxo geral das águas tende para oeste. O índice cárstico produziu um mapa previsional de feições exocársticas com 5 classes de carstificação. As áreas com alto índice de carstificação, em sua maioria, condicionadas à ocorrência da Unidade Nova América subunidade Lapão, foram denominadas ilhas cársticas e utilizadas de modo diferencial na avaliação da vulnerabilidade. A avaliação da vulnerabilidade pelo método COP apresentou 5 classes de vulnerabilidade, enquanto o PI com 4 classes. A maior abrangência, em área, em ambos os métodos corresponde à classe de baixa vulnerabilidade. A litologia e feições cársticas de superfície se mostraram como fatores de maior influência na determinação da vulnerabilidade. Diante desta gama de análises concluiu-se que (i) a faciologia, razões iônicas e potabilidade tendem a acompanhar o fluxo subterrâneo regional no aquífero; (ii) o modelo espacial da transmissividade demonstra área de maior potencial na porção oeste; (iii) a aplicação do índice cárstico revelou boa acuidade na expressão das feições superficiais; (iv) o método de vulnerabilidade COP apresentou resposta mais compatível com as características da área; (v) a análise combinada dos parâmetros hidrogeológicos e vulnerabilidade demonstrou a compatibilidade entre as ilhas cársticas (alta vulnerabilidade) e a maior potencialidade do aquífero. Assim, faz-se necessário uma maior atenção a essas áreas diante da elevada susceptibilidade à contaminação do aquífero Salitre. Essa pesquisa preencherá uma lacuna no conhecimento hidrogeológico dos domínios cársticos e sua gestão ambiental no estado da Bahia.

Palavras-chave: COP. PI. Regiões Cársticas. Isótopos. Transmissividade. Índice Cárstico

ABSTRACT

The Una-Utinga Basin, located in the central region of the Bahia state, contains an important karstic aquifer system, the Salitre Formation, which carbonatic rocks date from the Neoproterozoic and are divided into Gabriel/Nova América Unit and Nova América sub-unit Lapão. This work aims to present a hydrogeological characterization pioneer for the area, with a view to the hydrochemical, isotopic, transmissivity and vulnerability issues of the Salitre aquifer. For the hydrochemistry, it was used data from 35 wells, analyzed in LEPETRO/UFBA, and 17 samples from the CERB database. The isotopic analysis was done from 40 samples and performed in the Laboratory of Nuclear Physics/UFBA. The transmissivity was calculated by the analytical method of Theis and empirically recalculated by statistical analysis. For a better response of vulnerability cartography, assessed through the methods COP and PI, it was necessary to obtain a surface karsification index previously. As results, for water hydrochemical facies: 58% of bicarbonated, 23% chlorinated, 13% mixed and 6% sulfated. Regarding salinity, 48% of the waters was fresh, 33% brackish and 19% salty. The isotopic samples were divided into three classes, when compared $\delta^{18}\text{O}$ and STD mg/L. The isotope standard δD and $\delta^{18}\text{O}$ presents values of: δD between -2.1 ‰ and -46.3 ‰, and $\delta^{18}\text{O}$ between + 2.85 ‰ and -8.28 ‰. Concerning transmissivity, the response was given as a potentiometric map of the aquifer, which general flow of the waters tends to the west. The karst index generated a predictive map of features of the exocarste and divided the area into 5 karsification classes. The areas with a high rate of karsification, for the most part, are conditioned to the occurrence of the Nova América sub-unit Lapão, and were called karst islands and were used differently in the assessment of vulnerability. The vulnerability assessment using the COP method presented 5 classes of vulnerability, while the PI 4. The greater area coverage in both methods corresponds to the low vulnerability class. The lithology and karstic surface features were shown to be more influential factors in the determination of vulnerability. In view of this range of analyzes it was concluded that (i) the water facies, ionic ratios and potability tend to follow the regional underground flow in the aquifer; (ii) the transmissivity spatial model shows the area of greatest potential in the western portion; (iii) the application of the karstic index revealed good acuity in the expression of the surface features; (iv) the COP vulnerability method presented a more compatible response with the characteristics available in the area; (v) the combined analysis of the hydrogeological parameters and vulnerability demonstrated the compatibility among the karst islands (high vulnerability) and the greater spatial potentiality of the aquifer. Thus, it is necessary to pay greater attention to these areas in view of the high susceptibility to contamination of the Salitre aquifer. This research will fill a gap in the hydrogeological knowledge of karstic domains and their environmental management in the state of Bahia.

Keywords: COP. PI. Karst regions. Isotopes. Transmissivity. Karstic Index

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2.1 –Localização da Bacia Una-Utinga.....	17
Figura 1.2.2 - Pluviosidade da BUU e gráficos com dados de 2005 a 2014.....	19
Figura 1.2.3 - Classes de solos da BUU	22
Figura 1.2.4 - Uso e ocupação na BUU	23
Figura 1.2.5 - Representação das águas superficiais na BUU	25
Figura 1.2.6 - Contexto tectônico regional da Bacia Una-Utinga no Cráton São Francisco	27
Figura 1.2.7 - Geologia simplificada da área de estudo	29
Figura 1.2.8a - Exposição de seixo de granito na FB.....	30
Figura 1.2.8b - Exposição de seixo de gnaiss na FB.	30
Figura 1.2.8c - Exposição da FB alterada.....	30
Figura 1.2.9a - Rocha carbonática da FS - Exposição de estratificação.....	31
Figura 1.2.9b - Rocha carbonática da Formação Salitre, exposição na gruta Lapa do Bode	31
Figura 1.2.10 - Representação da altitude e classificação do relevo na BUU.....	36
Figura 1.6.1 - Medidor (sonda) multiparâmetro.	42
Figura 1.6.2 - Purgagem da água do poço.	42
Figura 1.6.3 - Filtragem de amostra para análise química.....	42
Figura 1.6.4 - Conjunto millipore, com filtros.	42
Figura 1.6.5 - Frasco de 500ml - análise química.	42
Figura 1.6.6 - Frasco de 100ml - análise química.	42
Figura 1.6.7 - Gráfico teórico de Horner de $s' \times \log (t/t')$	45
Figura 1.6.8 - Concepção do modelo empírico correlacionando os termos, Transmissividade -T e Capacidade Específica -Sc, pelo seu Log	46
Figura - 1.6.9 Metodologia da transformada do dado vetorial para o dado raster.....	49
Figura 1.6.12 - Diagrama do método PI, mostrando o Fator I e seus respectivos parâmetros considerados.	58
Figura 2.1.1 - Feições cársticas, evolução do lapiás para outras formas de absorção.....	60
Figura 2.2.1 - Feição exocarste negativa - dolina.....	63
Figura 2.2.3 - Zonas hidrológicas do carste.....	65
Figura 2.2.4 - Feição do endocarste. Caverna Lapa do Bode.....	65
Figura 2.2.5 - Feição do endocarste. Caverna na fazenda Natal.	65
Figura 2.3.1 - Distribuição global dos afloramentos das rochas carbonáticas	67
Figura 2.5.1 - Feição de captação de água subterrânea – Dolina	71

Figura 2.5.2 - Feição de captação de água subterrânea – Dolina	71
Figura 2.5.3 - Feições naturais - nascentes, surgências ou ressurgências.	72
Figura 3.2.1 - Modelo “origem-caminho-alvo adaptado para o aquífero carste, apresentando os principais parâmetros evidenciados na avaliação de vulnerabilidade.....	77
Figura 4.2.1 - Processo de dissolução das rochas carbonáticas.....	82
Figura 4.2.2 - Concentração de espécies de carbono inorgânico em condições de sistema aberto e sua variação em função do pH.....	83
Figura 4.3.1 - Relação entre a energia potencial e a distância entre os átomos para isótopos pesados e leves de uma molécula. A energia de dissociação difere para dois isótopos, e afeta as taxas de reação.	91
Figura 4.3.2 - Gráfico δD versus $\delta^{18}O$ de amostras de águas de chuva de diversas partes do mundo	94
Figura 4.3.3 - Impactos dos parâmetros geográficos nos valores de $\delta^{18}O$	95
Figura 4.3.4 - Composições isotópicas da molécula de água de uma massa de vapor d'água que foi formada sobre a superfície do oceano	96
Figura 4.4.1 - Sistema cárstico exibindo possíveis reservatórios hídricos	97
Figura 5.1.1 - Distribuição das águas dos poços amostrados e dados de água de poços da CERB na BUU.	101
Figura 5.1.2 - Diagrama de Piper, exibindo a classificação das águas dos poços amostrados (cor preta) e dados da CERB (cor vermelha) no aquífero cárstico Salitre na BUU	106
Figura 5.1.3 - Gráfico de dados de STD exibindo a classificação das águas nos pontos amostrados na BUU de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005.....	110
Figura 5.1.4 - Distribuição faciológica e relação do STD.....	112
Figura 5.1.5 - Diagrama de Gibbs processos ambientais das águas subterrâneas na BUU área de estudo.....	113
Figura 5.2.1 - Distribuição dos isótopos de oxigênio e hidrogênio no aquífero Salitre na BUU.	116
Figura 5.2.2 - Comportamento das águas amostradas e de água de chuva na BUU, com a Linha Meteorica Global – LMG.....	118
Figura 5.2.3 – Relação de Sólidos totais dissolvidos (SDT) com isótopo de oxigênio.....	118
Figura 5.5.4 – Correlação e comparação de dados de estudos nos aquíferos Salitre e Bambuí na Bahia	120
Figura 5.3.1 Feição histogramática (A) para os valores logarítmicos (B) de Sc e T, respectivamente.	122

Figura 5.3.2 - Modelo de regressão linear entre os valores de Log (T) e Log (Sc).....	122
Figura 5.3.3- Distribuição histogramática de T empírico (A) e Log (T empírico) (B)	124
Figura 5.3.4 - Variograma experimental associado ao teórico representado pela função exponencial.....	125
Figura 5.3.5 – Mapa de Distribuição de T _{empírica}	127
Figura 5.4.1 - Dolinas reconhecíveis em campo	128
Figura 5.4.2 – Feições cársticas e declividade.....	130
Figura 5.4.3 - Mapa de divisão do relevo por classes de declividades, para a área de estudo	132
Figura 5.4.4 - Mapa de dolinas e lineamentos estruturais.	134
Figura 5.4.5 - Mapa de densidade de dolinas (Fator Fs) e Mapa de densidade de lineamento (Fator Le).....	136
Figura 5.5.6 - Índice de carstificação – IC, exibindo o zoneamento das classes a partir do grau de carstificação	137
Figura 5.5.7 - Caverna na Fazenda Natal, próxima a gruta do Poço Encantado e da Lapa do Bode.....	140
Figura 5.5.8 - Caverna Poço Azul, localizada na porção Sul da área de estudo.	141
Figura 5.5.9 - Representação gráfica das ocorrências das ilhas cársticas na Unidade Nova América, subunidade Lapão	142
Figura 5.5.1 - Representação dos parâmetros C, O e P, para o método COP	145
Figura 5.5.2 - Representação dos parâmetros P e I, para o método PI.....	146
Figura 5.5.3 - Mapas de vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre na BUU pelos métodos COP e PI.....	148
Figura 5.5.4 - Representação do percentual (comparativo) das classes de vulnerabilidade nos métodos COP e PI	149
Figura 5.5.5 - Mapas binários “0” e “1” para a Transmissividade, Vulnerabilidade PI e Vulnerabilidade COP na área da BUU	151
Figura 5.5.6 – Mapas binários “0” e “1” gerados pelo método booleano utilizando o operador “AND”	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.6.2 - Dados utilizados nos fatores P e I e respectivas referências	59
Tabela 3.2.1 - Métodos e parâmetros correspondentes na utilização da estimativa de vulnerabilidade de aquíferos cársticos.....	78
Tabela 4.3.1 - Abundâncias médias dos isótopos estáveis e razões isotópicas no padrão de referência.	92
Tabela 4.4.1 – Estudos relevantes de T obtida da forma empírica.....	99
Tabela 5.1.1 - Dados hidroquímicos.....	102
Tabela 5.1.2 - Fácies hidroquímicas e potabilidade das águas.....	108
Tabela 5.1.3 - Classificação da salinidade das águas na BUU, de acordo com os padrões de referências.....	110
Tabela 5.2.1 - Dados isotópicos.....	114
Tabela 5.3.1 - Sumário descritivo dos valores de T e Sc usados na elaboração do modelo empírico.....	121
Tabela 5.3.2 - Sumário descritivo para os dados de T empírico	123
Tabela 5.3.1 - Domínios de Tempírica e suas áreas equivalentes com valores em números inteiros	125
Tabela 5.5.1 - Similaridade e/ou discrepâncias entre os métodos.....	147
Tabela 5.5.2 - Classes de vulnerabilidade dos métodos COP e PI e suas relações com feições e aspectos regionais.....	148

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	14
1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
1.2.1 Localização e aspectos econômicos	16
1.2.2 Aspectos climatológicos	18
1.2.3 Solos, Geomorfologia e Uso do Solo	21
1.2.4 Aspectos hidrológicos.....	24
1.2.5 Aspectos Geológicos regionais e locais.....	26
1.2.6 Aspectos Geomorfológicos regionais e locais.....	33
1.3 OBJETIVOS.....	37
1.3.1 Objetivo Geral	37
1.3.2 Objetivos Específicos	37
1.4 APRESENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	37
1.5 JUSTIFICATIVA	39
1.6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
1.6.1 Etapa de pré-campo, mapas e rotas	40
1.6.2 Etapa de Campo - amostragens	40
1.6.3 Análises em laboratório	41
1.6.4 Tratamento de dados.....	44
1.6.5 Cálculo da capacidade específica e da transmissividade.....	44
1.6.6 Metodologias de mapeamento das feições cársticas e lineamentos estruturais.....	47
1.6.7 Métodos de vulnerabilidade.....	50
1.6.8 Correlação entre vulnerabilidade e potencialidade.....	59
CAPÍTULO 2	60
SISTEMA CÁRSTICO	60
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	60
2.2 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO CARSTE	62
2.3 GEOMORFOLOGIA E O MEIO CARSTE	65
2.4 HIDROLOGIA CARSTICA E PROCESSO DE CARSTIFICAÇÃO	67
2.5 REPRESENTANTES DA HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA	69
2.5.1 Feição de recarga de água subterrânea	70

2.5.2 Feição de descarga de água subterrânea	71
CAPÍTULO 3	73
VULNERABILIDADE DO CARSTE	73
3.1 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS	73
3.2 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS CÁRSTICOS	76
3.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS COP E PI	78
CAPÍTULO 4	80
HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA	80
4.1 HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA	80
4.2 HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	80
4.2.1 Elementos químicos que mais ocorrem em aquíferos cársticos	82
4.2.2 Classificação da Faciologia Hidroquímica das Águas Subterrâneas	84
4.3 ISÓTOPOS NA HIDROGEOLOGIA CARSTICA	86
4.3.1 Isótopos estáveis	88
4.3.2 Isótopos de Oxigênio e hidrogênio, desempenho em meio aquoso	92
4.4 PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO AQUÍFERO CÁRSTICO	96
4.4.1 Métodos empíricos	98
CAPÍTULO 5	100
RESULTADOS E DISCUSSÕES	100
5.1 HIDROQUÍMICA DO CARSTE NA BACIA UNA-UTINGA	100
5.1.1 Fácies hidroquímicas	100
5.1.2 Salinidade das águas subterrâneas	109
5.1.3 Análise espacial dos parâmetros hidroquímicos	111
5.2 ANÁLISES ISOTÓPICAS	114
5.3 CAPACIDADE ESPECÍFICA E TRANSMISSIVIDADE NA BUU	120
5.3.1 Interpretação dos dados analíticos	120
5.3.2 Análise empírica	121
5.3.3 Modelo geoestatístico	125
5.4 FEIÇÕES CÁRSTICAS	128
5.4.1 Feições cársticas identificadas na área de estudo	128
5.4.2 Mapa de dolinas e lineamentos estruturais	133
5.4.3 Índice cárstico	135
5.5 VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO CÁRSTICO NA BUU	143
5.5.1 O método COP	143

5.5.2 O método PI.....	144
5.5.3 Comparação entre o COP e o PI.....	147
5.5.4 Relação entre a potencialidade do aquífero Salitre, associação à contaminação ..	150
CAPÍTULO 6	154
CONCLUSÃO.....	154
REFERÊNCIAS	157

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo aborda os conhecimentos teóricos gerais, os objetivos, a importância do estudo e justificativas. Bem como informações dos aspectos fisiográficos e dos métodos aplicados.

1.1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização das águas subterrâneas tem aumentado em função do crescimento populacional, do esgotamento e poluição das fontes de águas superficiais, além disso, pelo aumento do uso para irrigação e indústria. Esse aumento é perceptível especialmente nas regiões cársticas. Na Bahia, estas regiões encontram-se representadas, principalmente, pelas bacias intracratônicas neoproterozoicas de Irecê, Salitre, Una-Utinga e Oeste, caracterizadas, sobretudo, pelos Grupos Una e Bambuí.

Na região Central do Estado da Bahia, o desenvolvimento do cultivo de produtos agrícolas impulsionou a demanda maior pela água subterrânea, de maneira especial para irrigação. Muito embora a região mencionada esteja inserida numa das principais bacias hidrográficas do Estado, a do rio Paraguaçu, representada principalmente pelos rios perenes: Santo Antônio, Utinga, Una e Paraguaçu – ocorre baixa densidade de drenagem, que não supre a demanda crescente pela água, favorecendo a intensa exploração de um dos principais aquíferos cársticos, o Salitre. Assim, é observado o aumento da construção de poços tubulares, principalmente durante o período da seca. Quando a água subterrânea é usada também como fonte emergencial, atendendo a programas relacionados às políticas governamentais.

A visão imediatista dos usos das águas subterrâneas sujeita os aquíferos aos impactos da exploração descontrolada e ocupação indisciplinada do solo, podendo interferir na qualidade dessas águas. Silva (2005), em estudos realizados na microrregião de Irecê, observou que o aumento do cultivo de produtos agrícolas na área, intensificou a perfuração de poços e produziu o rebaixamento do nível freático dos aquíferos em 1 m/ano, comprometendo a potencialidade hídrica desses reservatórios. Desta forma, o monitoramento das águas subterrâneas é considerado uma importante ferramenta para proporcionar aplicação de táticas e políticas de assistência e conservação dos reservatórios subterrâneos (VRBA,1988).

O aquífero cárstico é o resultado da ação solubilizadora das águas nas rochas

carbonáticas, onde a dissolução de tais rochas resulta num substrato com características físicas e químicas próprias, determinadas pela maior ou menor intensidade do processo de dissolução no pacote rochoso (NEGRÃO, 1987). Estas características são o resultado do processo de carstificação, no qual intervêm diversos fatores geológicos, que tem como mecanismo básico a dissolução pela água em uma rocha carbonática (solúvel) fissurada com entradas de águas de superfície em condutos localizados (sumidouros). O modo localizado de percolação das águas deve-se à variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, que é muito maior nos meios cársticos que em outros meios permeáveis (SILVA, 2002).

As regiões cársticas são consideradas áreas de interesse econômico e hidrogeológico, pois, na maioria das vezes, dispõem de solos agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e apresentam importância ambiental principalmente pelas feições geomorfológicas resultantes da dissolução da rocha carbonática, como dolinas e sumidouros, ficando, portanto, muitas vezes vulneráveis à contaminação antrópica, associada a fatores característicos deste tipo de ambiente como: baixa espessura dos solos, concentração de fraturas e carstificação nas camadas superiores do aquífero. Além da ocorrência de pontos de recarga em cavidades e condutos formados pelo processo de carstificação (GOLDSCHIEDER, 2002).

A condição quase que frequente da inexistência de solo e sedimentos areno-argilosos na zona não saturada faz com que sua capacidade de atenuação de contaminantes seja mínima, tendendo a elevar a condição de susceptibilidade no carste. Assim, o estudo da vulnerabilidade à contaminação do carste é de essencial importância, por permitir o conhecimento dos fatores que comprometam a qualidade da água. O termo vulnerabilidade, de acordo com Hirata e Fernandes (2005), é conceituado como a susceptibilidade intrínseca do meio aquífero em ser desfavoravelmente afetado por uma carga contaminante de natureza antrópica.

O desenvolvimento desta pesquisa deu-se na porção central do estado da Bahia, no aquífero cárstico Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU), numa área de 5.026 km², englobando parte dos municípios de Andaraí, Barra da Estiva, Ibiquera, Iramaia, Itaetê, Lajedinho, Lençóis, Mucugê, Nova Redenção, Rui Barbosa, Utinga e Wagner. Nesta região, segundo banco de dados de poços da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia – CERB, abrangendo o aquífero cárstico, foram construídos 125 poços tubulares, com profundidade média de 134 metros (39,6 m a 250 m) e vazão de 5,98 m³/h a 37,71 m³/h, para consumo humano e irrigação.

A área de estudo apresenta bons solos e conformação topográfica pouco acidentada, o que favorece a prática da agricultura, principal atividade econômica desenvolvida, e que

utiliza intensamente as águas subterrâneas devido à pequena disponibilidade de água superficial. Está sobreposta a um dos principais aquíferos da região, o cárstico Salitre. Por suas características, principalmente hidrogeológicas, esse aquífero é considerado potencialmente vulnerável, onde são desenvolvidas atividades antrópicas contaminantes como agricultura irrigada com o uso de agrotóxicos, mineração, disposição de resíduos sólidos em locais inadequados e problemas relacionados à ausência de saneamento básico nas zonas urbanas das cidades inseridas na área de estudo.

Foram aplicados os métodos COP e PI para o diagnóstico da vulnerabilidade regional da área, bem como a elaboração de diversos gráficos e mapas temáticos (transmissividade, índice cárstico, dentre outros) que auxiliaram nos resultados desta pesquisa, na intenção de cumprir os objetivos propostos.

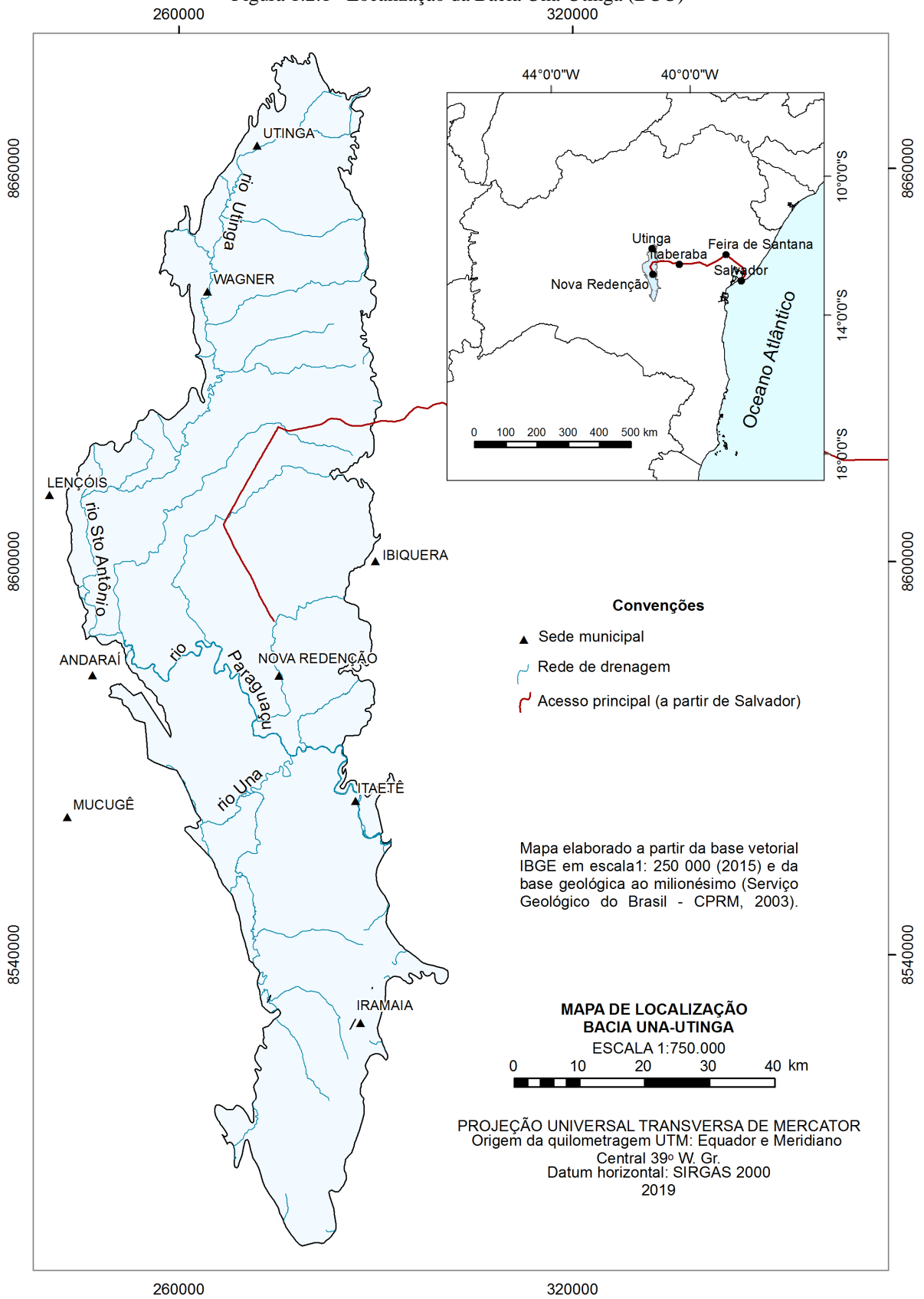
1.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este item trata da descrição fisiográfica da área de estudo, sua localização, aspectos climáticos, geológicos e recursos hídricos.

1.2.1 Localização e aspectos econômicos

A área de estudo está localizada na porção central do Estado da Bahia, distando da capital do Estado, Salvador, aproximadamente 420 km (Figura 1.2.1) com uma área de 5.026 km², abrangendo parte dos seguintes municípios: Andaraí, Barra da Estiva, Ibiquera, Iramaia, Itaetê, Lajedinho, Lençóis, Mucugê, Nova Redenção, Rui Barbosa, Utinga e Wagner. Encontra-se envolvida pela poligonal entre as coordenadas geográficas: (i) 42°29' W e 11°28' S, (ii) 39°47' W e 11°28' S, (iii) 39°47' de W e 14°00' S, (iv) 42°29' W e 14°00' S. As principais vias de acesso para a região são as rodovias BA-142 e a BR-242.

Figura 1.2.1 –Localização da Bacia Una-Utinga (BUU)

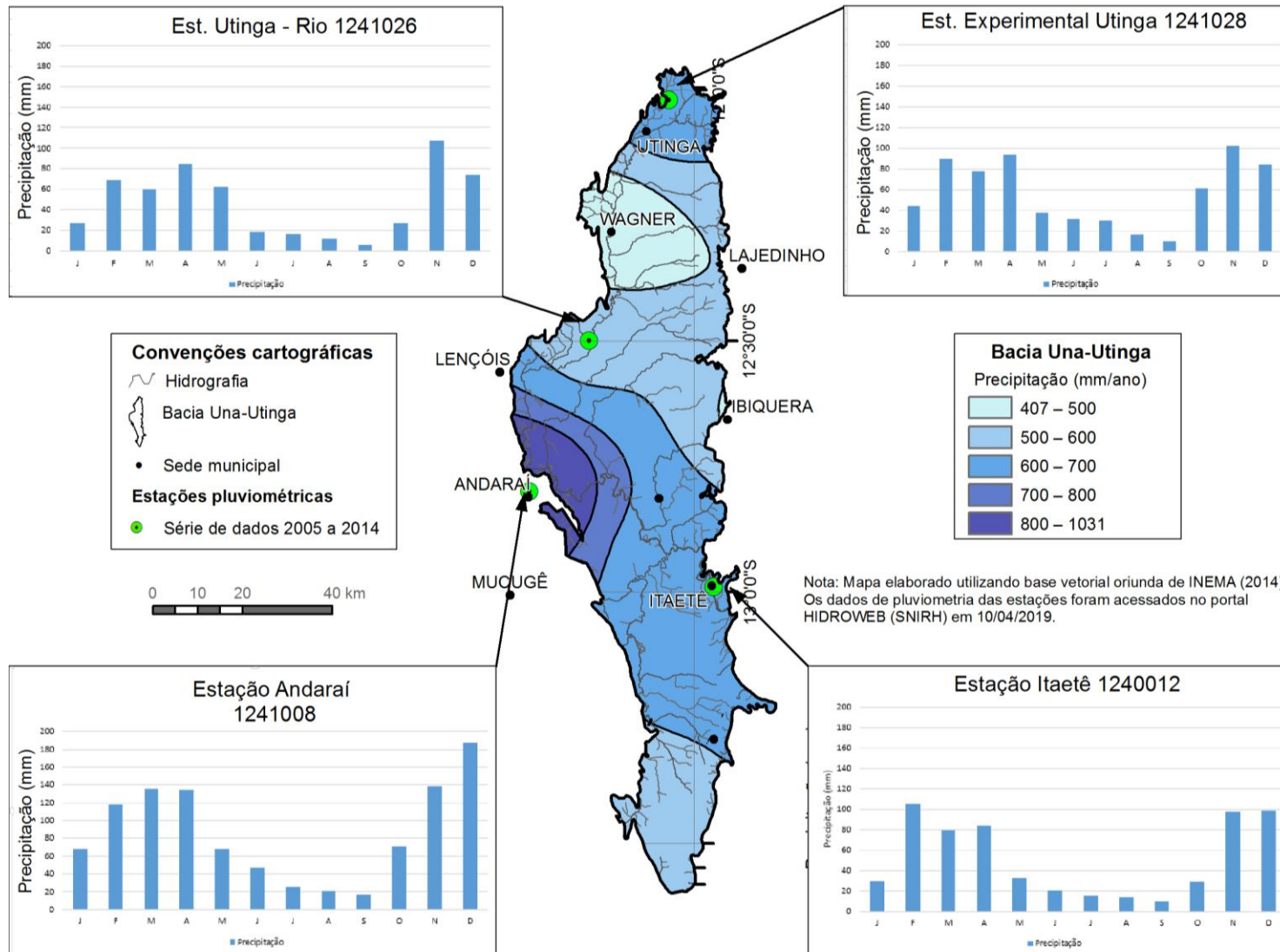


Fonte: Elaboração própria.

1.2.2 Aspectos climatológicos

A área de estudo está inserida do contexto do Polígono das Secas. Apresenta um clima transicional entre o tropical-úmido e o semiárido, tem a contribuição de chuvas, baixa umidade do ar e significativa evaporação (ARAÚJO, 2011). Na Figura 1.2.2 verifica-se que as precipitações estão entre 407 e 1031 mm/anuais, podendo ter períodos de seca mais prolongados, ocasionando prejuízos à economia da região. Ainda podem ser constatadas duas estações bem definidas em toda área, a partir de dados de quatro estações pluviométricas de 2005 a 2014, plotados em gráficos, onde os meses de maio a outubro caracterizam a estação mais seca e de novembro a abril a estação chuvosa. É observado que na porção oeste a pluviosidade é maior, devido a barreira orográfica da serra do Sincorá que bordeja essa porção da área de estudo.

Figura 1.2.2 - Pluviosidade da BUU e gráficos com dados de 2005 a 2014



Fonte: Dados da Rede do INMET. Acesso ao HIDROWEB em 18 de dezembro de 2018 - de 2005 a 2014.

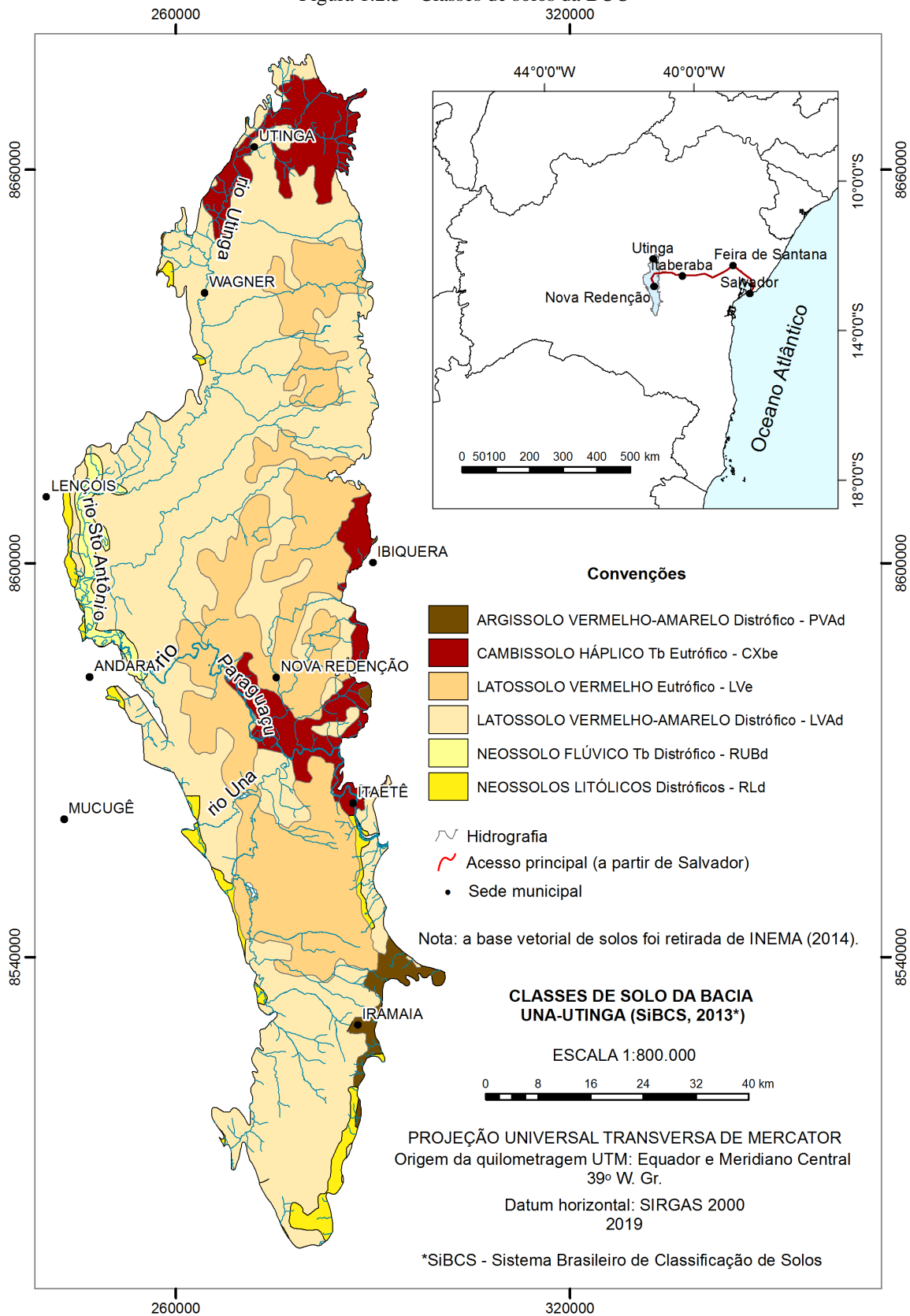
1.2.3 Solos, Geomorfologia e Uso do Solo

Pedologicamente, a BUU é representada por argissolos vermelho-amarelo distrófico, cambissolos háplicos eutróficos, latossolos vermelho-amarelo e vermelho eutrófico (unificado), neossolos flúvicos distróficos e litólicos distróficos. Pode-se observar, na Figura 1.2.3, que os latossolos são os principais representantes pedológicos, ocorrendo em mais de 80% da área de estudo, seguidos dos cambissolos em partes das porções norte, leste e centro sul.

Geomorfologicamente, grande parte da BUU está inserida no contexto da unidade dos pediplanos carstificados que engloba a Formação Salitre, de acordo com RADAM (1981). Essa unidade apresenta uma cobertura espessa, vermelha, geralmente coluvial, de latossolos e argilas de descalcificação do calcário na parte superior, a qual aparece remanejada nas encostas. Podem ocorrer linhas de material grosseiro composto por fragmentos de rochas e silicificações. Há possibilidade desse material se apresentar preenchendo bolsões entre afloramentos de rochas calcárias.

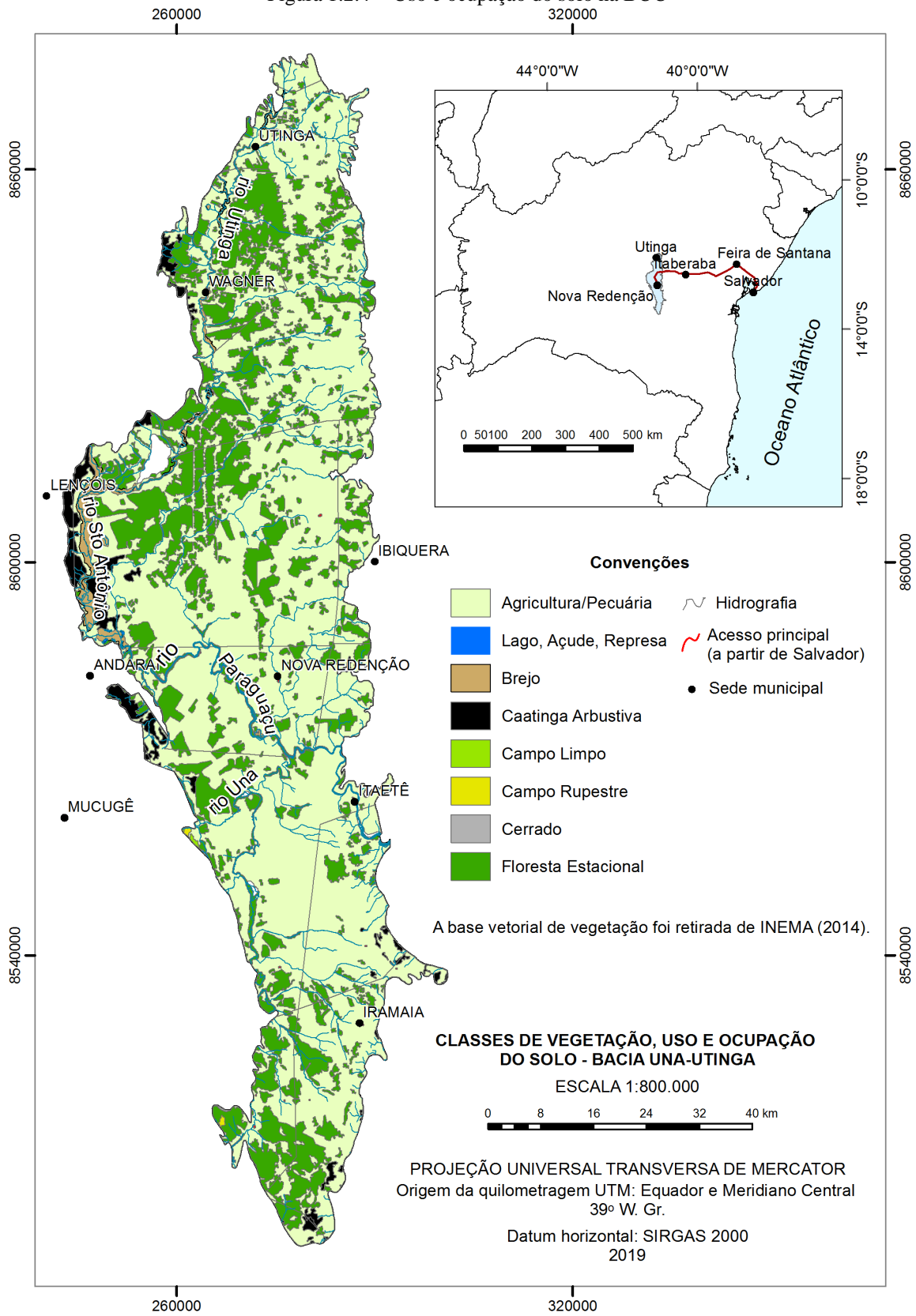
As coberturas vegetais e o uso e ocupação na BUU, de acordo com a Figura 1.2.4, são representadas por: agricultura/pecuária, área urbana, brejo, caatinga arbustiva e arbórea, campo limpo, campo rupestre, cerrado, floresta estacional, lago, açude e represa. Verifica-se que a agricultura e a pecuária são os usos mais exercidos na região de estudo ocupando 69% da área, seguido da cobertura vegetal floresta estacional, que ocupa parte da porção oeste, sul e disseminada na porção centro-sul, num total de 26,52%, a caatinga arbustiva e arbórea são incipientes na porção oeste da área estudada, ocupando 2, 52%.

Figura 1.2.3 - Classes de solos da BUU



Fonte: Elaboração própria.

Figura 1.2.4 - Uso e ocupação do solo na BUU



Fonte: Elaboração própria

1.2.4 Aspectos hidrológicos

A Bacia Una-Utinga (BUU) apresenta rede de drenagem caracterizada por rios perenes e intermitentes, que representam as águas superficiais. O rio Paraguaçu, que é o principal rio perene da região, ocorre na porção central da área juntamente com o rio Santo Antônio, na porção sul o rio Una e na porção norte o rio Utinga. As águas subterrâneas têm como representante o aquífero cárstico Salitre, objeto desse estudo.

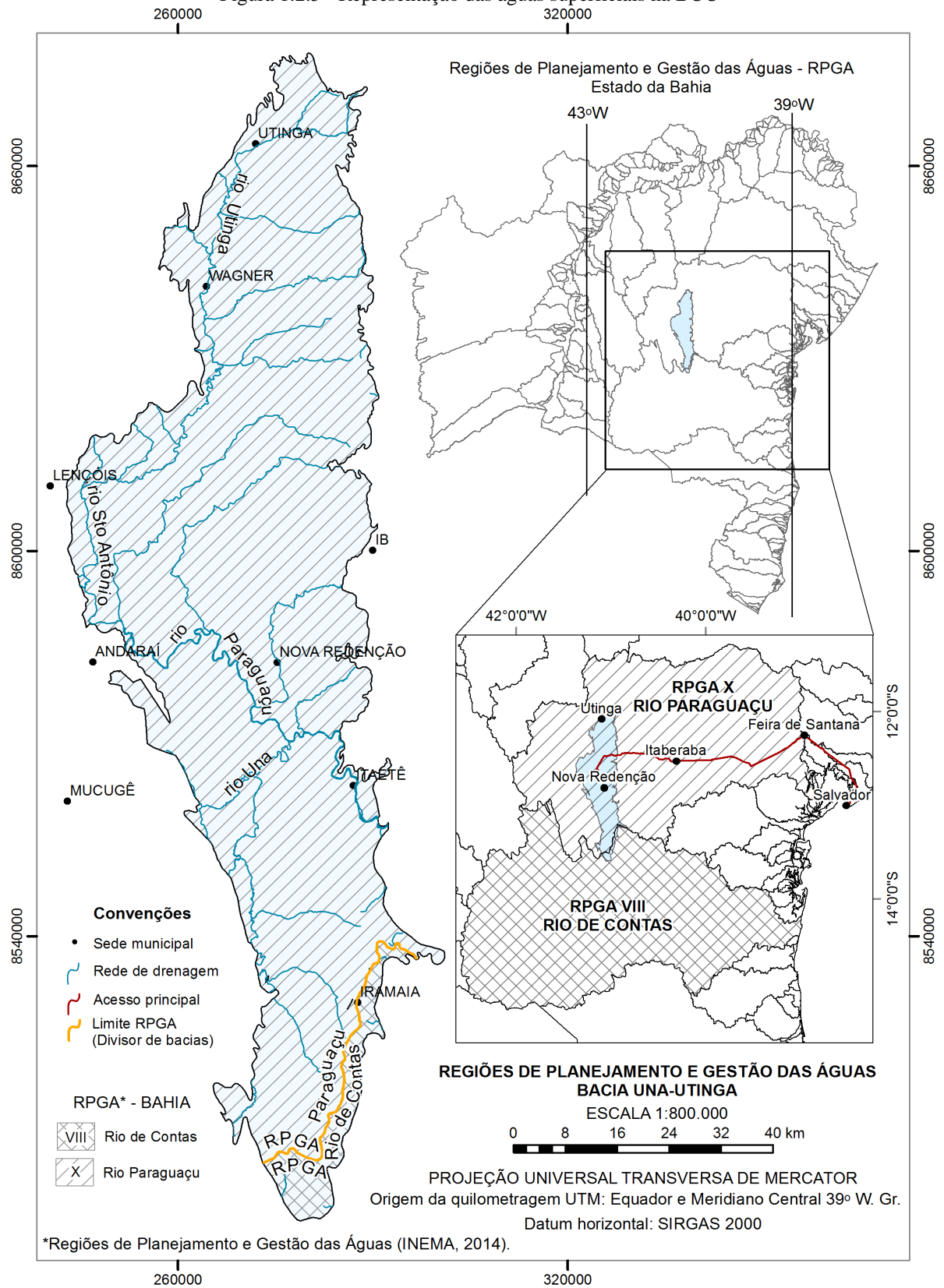
1.2.4.1 Águas superficiais

As águas superficiais na BUU são representadas, pelos rios Santo Antônio, Utinga, Una e Paraguaçu (Figura 1.2.5). Foram divididas, nesse estudo, de acordo com a inserção nos Comitês de Bacias Hidrográficas – CBH. Sendo assim, identificou-se dois Comitês abrangendo, aproximadamente, 92% dos municípios que fazem parte da BUU: o CBH Paraguaçu e o CBH Contas (INEMA, 2018).

O CBH Paraguaçu localiza-se no centro-oeste do estado da Bahia, ocupando 10% do território baiano numa área de 54,877 km² na qual encontra-se inserida uma população de 1.657.254 habitantes. Abrange 86 municípios da Região de Planejamento de Gestão das Águas – RPGA X. Assim os municípios de Lençóis, Wagner, Ruy Barbosa, Ibiquera, Utinga, Itaetê e Nova Redenção integram 100% essa RPGA, enquanto que os municípios de Barra da Estiva e Iramaia ocupam menos de 40% do território nesta RPGA (INEMA, 2018). Estes municípios fazem parte total ou parcialmente da BUU.

O CBH Contas abrange a RPGAVIII, a qual apresenta os seguintes limites geográficos: ao Norte, com as Bacias Hidrográficas do rio Paraguaçu e Recôncavo Sul; a Oeste, com a Bacia Hidrográfica do rio São Francisco; a Leste, com o Oceano Atlântico; e ao Sul, com as Bacias Hidrográficas do rio Pardo e do Leste e com o Estado de Minas Gerais. Ocupa uma área de 55.483 km², na qual encontra-se inserida uma população de 1.242.439 habitantes. Este Comitê integra 76 municípios, sendo que 46 municípios em 100% nessa RPGA. Entretanto, os municípios de Barra da Estiva e Iramaia estão inseridos com 60% de suas áreas no território desta RPGA e o município de Mucugê está inserido em 40% da RPGA (INEMA, 2018). Estes municípios são inseridos parcialmente na BUU.

Figura 1.2.5 - Representação das águas superficiais na BUU



Fonte: Elaboração própria

Observa-se, portanto, que as águas superficiais da Bacia Una-Utinga (BUU), estão inseridas quase que integralmente no CBH Paraguaçu, na RPGA X.

1.2.4.2 Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são representadas pelo aquífero cárstico Salitre. Não existem estudos hidrogeológicos para o aquífero Salitre na BUU. Esse aquífero ocorre também na bacia de Irecê, onde diferentemente da BUU, é alvo de vários estudos (hidroquímicas, potencialidade, vulnerabilidade e risco à contaminação), além dos hidrogeológicos realizados por Bastos Leal e Silva (2004), Silva (2005), Nossa (2011), Salles (2017), Gonçalves (2017), Gasser e Cruz (2018), entre outros.

De acordo com Pedreira *et al.* (1987), a Formação Salitre, que abriga o aquífero homônimo, possui feições cársticas bem desenvolvidas, que associadas às zonas de fraturas, formam os reservatórios com expressividade do ponto de vista de recepção, armazenamento e circulação de águas subterrâneas.

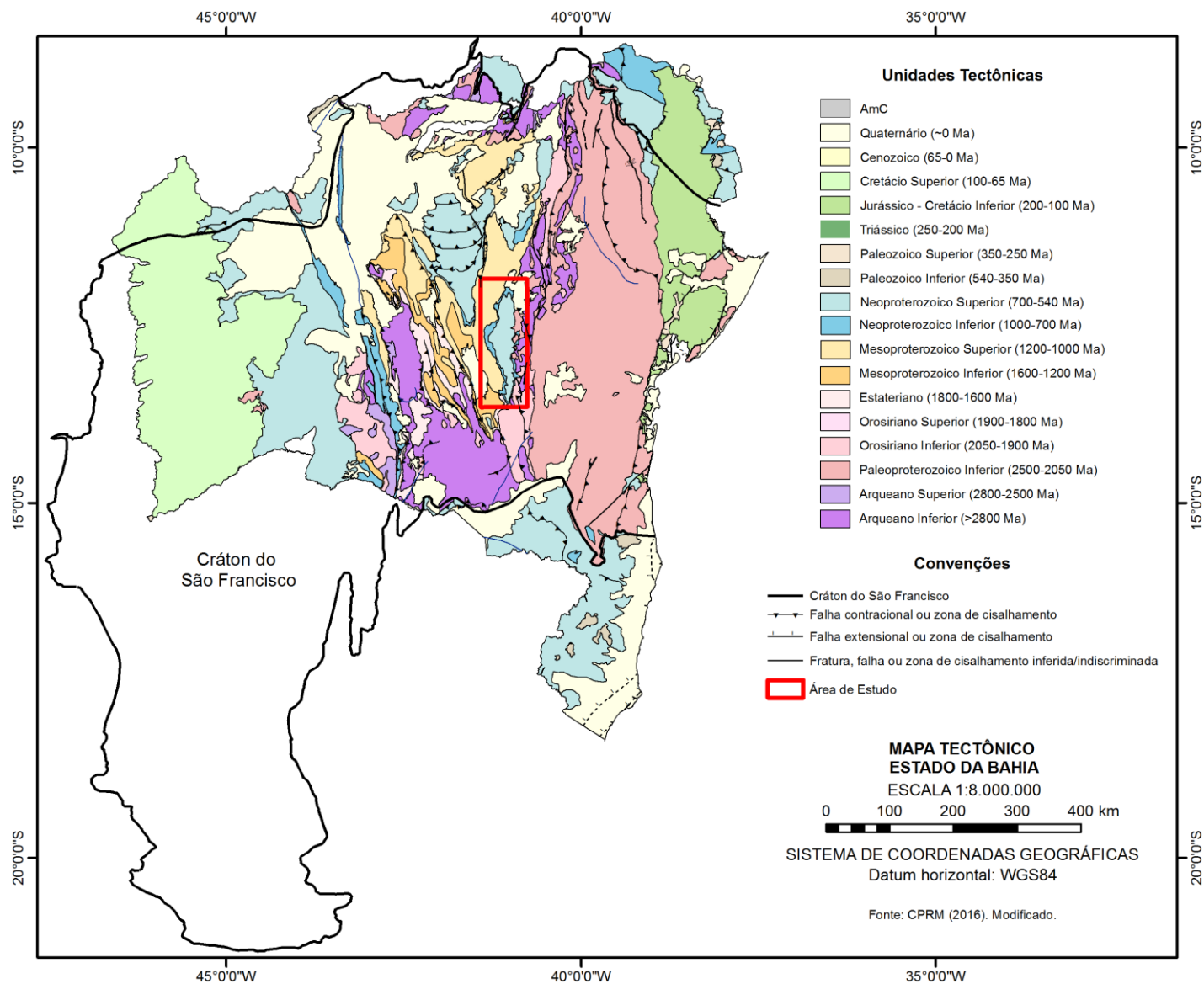
Em termos de captação do aquífero cárstico, são cadastrados, na CERB, 125 poços tubulares, utilizados para abastecimento urbano e rural.

1.2.5 Aspectos Geológicos regionais e locais

Regionalmente, a BUU está inserida no Cráton do São Francisco – CSF, no domínio geotectônico da Chapada Diamantina, representado por coberturas sedimentares neoproterozoicas (Figura 1.2.6). O CSF é uma porção estável da litosfera desenvolvida no final do neoproterozoico diante da junção dos blocos cratônicos antigos e que, associados às suas bacias marginais e coberturas sedimentares, de acordo com Alkmin (2004), formaram uma das mais importantes unidades geotectônicas da América do Sul.

O CSF envolve associações litoestratigráficas representadas por gnaisses arqueanos e granitoides paleoproterozoicos, além de associações vulcanossedimentares arqueanas (SILVA & CUNHA, 1999). As rochas arqueanas e paleoproterozoicas são recobertas por metassedimentos do Supergrupo Espinhaço e Supergrupo São Francisco, depositadas durante o meso e neoproterozoico, respectivamente. Formações superficiais cenozoicas complementam a sequência estratigráfica na região (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Figura 1.2.6 - Contexto tectônico regional da Bacia Una-Utinga no Crátão São Francisco



Fonte: Elaboração própria.

O Supergrupo São Francisco – SSF é caracterizado, predominantemente, por rochas carbonáticas depositadas em ambiente marinho. De acordo com Misi e Silva (1996), este é o resultado da sedimentação de uma ampla plataforma carbonática, muito rasa, que se processou durante o neoproterozoico, abrangendo uma boa parte do território brasileiro e cujos registros mais importantes estão preservados na Bahia, em Minas Gerais e em Goiás.

Assim, as sequências sedimentares neoproterozoicas do CSF amontoaram-se em bacias que se desenvolveram diante de eventos extensionais que aconteceram entre 900 e 600 Ma. De acordo com Sanches *et al.* (2007), estas bacias são distribuídas em ambientes geotectônicos estáveis (cratônicos), representados na Bahia por sucessões carbonáticas e siliciclásticas do grupo Bambuí (Bacia do São Francisco) e do grupo Una (Bacia de Irecê e Una-Utinga). Pode ser observada, na Figura 1.2.6, a delimitação atual do CSF e a deposição das bacias carbonáticas do São Francisco, nas bacias de Irecê e Una-Utinga, em destaque.

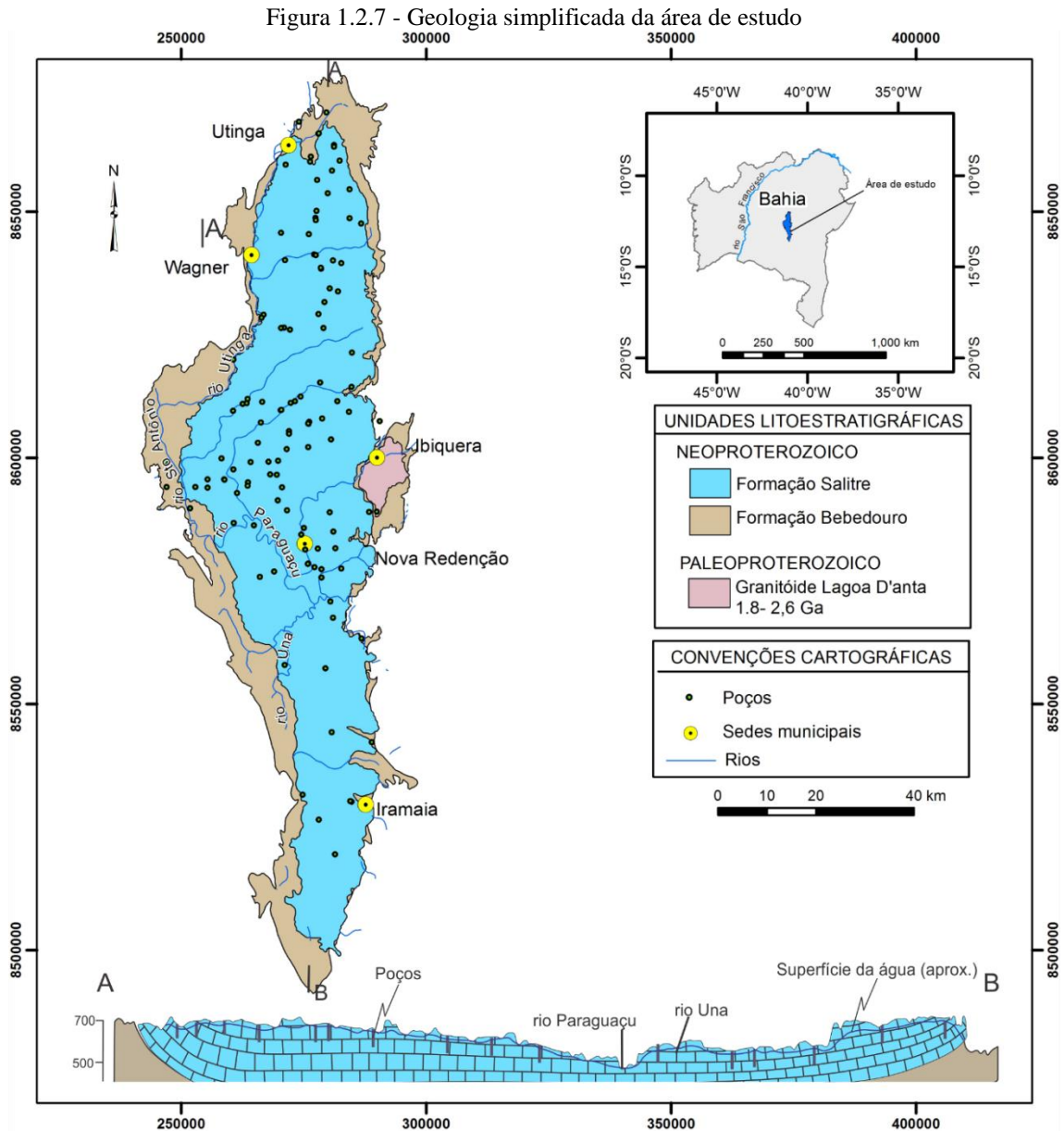
Na região oeste da Bahia o SSF é representado pelo Grupo Bambuí e na Chapada Diamantina pelo Grupo Una – GU (GUIMARÃES *et al.*, 2008 e LOUREIRO *et al.*, 2009).

A BUU faz parte do SSF e tem como representante litológico o GU de idade neoproterozoica, que contempla parte das coberturas sedimentares do CSF. De acordo com Silva (1994), o GU é composto por carbonatos terrígenos que afloram não só na BUU, mas nas bacias de Irecê e Ituaçu. O nome Grupo Una é devido aos calcários do rio Una, apresentados por Derby (1905). A perfeita correlação estratigráfica entre as unidades litoestratigráficas definidas no GU e no Grupo Bambuí da Bacia do São Francisco, podem ser verificadas em publicações realizadas por Misi e Dardene na década de 70 (MISI & SILVA, 1994), essa correlação recomenda um modelo de sedimentação epicontinental para essas sequências.

Localmente, a geologia da área de estudo é representada pelo GU, o qual segundo Silva (1994), é classicamente dividido em duas formações do topo para base: a Formação Bebedouro, representada por diamictitos, arenitos e pelitos, e a Formação Salitre, que apresenta várias litofácies carbonáticas depositadas em ambiente marinho raso de planície de maré, de acordo com Dominguez (1993).

De acordo com Moraes Filho, Leal e Moraes (2001), estruturalmente a BUU foi afetada por episódios de deformação rúptil-dúctil, gerando várias famílias de fraturas, destacando como principais os sistemas NW e NE.

A BUU está representada de forma simplificada do topo para a base, com a Formação Bebedouro e pela Formação Salitre (Figura 1.2.7), esta última abriga o objeto deste estudo, o aquífero cárstico Salitre.



Fonte: CPRM, 2003.

A Formação Bebedouro – FB é representada por metassedimentos silte-argilosos, adjuntos a metagrauvas conglomeráticas. Por apresentar matriz e clastos com características peculiares, esses atributos admitem classificar a rocha conglomerática como diamictito ou mixtito. O topo desta Formação é composto por lentes de quartzito arcossiano médio, com pirita disseminada. Existe uma correlação entre a FB e as Formações Jequitáí, Macaúbas e Carrancas, em Minas Gerais e Goiás (MISI & SILVA, 1994).

Na BUU, para Silva (1994), a FB aflora em faixas variáveis bordejando toda bacia (Figura 1.2.7). No flanco leste, observa-se a não conformidade dessa formação com o embasamento cristalino, já no flanco oeste, a Formação é discordante ou desconforme sobre as Formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu.

Compreende diamictitos, arenitos e pelitos, onde os clastos dos diamictitos podem variar desde 80 cm a milímetros (Figuras 1.2.8 (a, b)) próximo à base da Formação e na maioria dos afloramentos. Litologicamente ocorrem gnaisses, granitos, pegmatitos e quartzitos, esses em quantidades subordinadas. Ocorrem arenitos na porção intermediária da Formação, exibindo estratificação paralela e cruzada, com marcas onduladas no topo de algumas camadas.

Figura 1.2.8a - Exposição de seixo de granito na FB.
8667882 mN/285242 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

Figura 1.2.8b - Exposição de seixo de gnaiss na FB.
8667882 mN/285242 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

Figura 1.2.8c - Exposição da FB alterada
8667882 mN/285242 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

Os pelitos, com ou sem clastos associados, intercalam as camadas de arenitos. Guimarães e Pedreira (1990) ressaltam que a FB ocorre em discordância erosiva, temporal e por falha com as unidades basais do grupo Chapada Diamantina e em concordância gradativa

com a sequência carbonática superior da Formação Salitre. Revelam ainda que os afloramentos encontrados são raros e modo geral ocorrem intemperizados (Figura 1.2.8c).

A Formação Salitre (FS) foi denominada por Branner (1911) por calcário Salitre, a partir de um representante litológico desta Formação aflorando no vale do rio Salitre, na Bahia. É representada por um aglomerado de rochas predominantemente carbonáticas (Figura 1.2.9 (a, b)) apresentando níveis pelíticos, acatada como depósito de plataforma estável (NOSSA, 2011).

Figura 1.2.9a - Rocha carbonática da FS - Exposição de estratificação

8527851 mN/0272312 mE/24L – Itaetê-Ba



Fonte: Autoria própria.

Figura 1.2.9b - Rocha carbonática da Formação Salitre, exposição na gruta Lapa do Bode

8569304 mN/276052 mE/24L – Itaetê-Ba



Fonte: Autoria própria.

Segundo Misi (1979), Pedreira *et al.* (1987) e Sampaio *et al.* (2001), a FS tem como característica apresentar espessas sequências de calcarenitos, calcilutitos, calcissiltitos e dolomititos interpostos, algumas vezes com sequências terrígenas subordinadas compostas por silexitos, arenitos, siltitos, laminitos e margas. Para estes autores, a Formação alcança uma espessura máxima de 530 metros. Segundo Misi e Silva (1994), a FS é composta, da base para o topo, por unidades carbonáticas e pelito-carbonáticas demonstrando ciclos deposicionais e transgressões marinhas.

A FS foi datada, através dos métodos de datação radiométricas, por Neves, Cordani e Torquato (1980) e Macedo e Bonhome (1984) com idade Rb/Sr de 760 Ma, já Srivastava (1988, 1989) determinou idades entre 950-570 Ma, através de estudos com base em estromatólitos, onde aferiu idade neoproterozoica.

As unidades de base da FS encontram-se repousando discordantemente acima das fácies siliciclásticas da FB, prevalecendo no topo fácies carbonáticas que passam para fácies predominantemente siliciclásticas (metargilitos, metassiltitos e margas).

Dominguez (1996) descreve para a Bacia de Irecê a Formação Salitre nas seguintes unidades litológicas:

1) Unidade Jussara: composta por calcarenitos finos e grossos, calcissiltitos e calcilutitos de coloração cinza-escuro e preta, apresentam laminação plano-paralela e estratificação cruzada, compostos com oncóides, oóides e intraclastos, e localmente quartzo. A deposição desta Unidade foi em ambiente litorâneo raso sob a ação de ondas e correntes sujeito a ação de tempestades.

2) Unidade Gabriel: composta por intercalações de calcissiltitos, calcilutitos e calcarenitos fino de coloração rosa, creme e marcas onduladas. Possivelmente, a deposição desta Unidade foi em zona litorânea (*shoreface*), sob a ação de ondas. Podem ser encontrados cristais cúbicos de pirita e/ou limonita nesta Unidade.

3) Unidade Nova América: composta por calcilutitos cinza-escuro mostrando acamadamento paralelo, com espessura centimétrica, ocorrem intercalados a finas lâminas irregulares e ondulantes. Podem ser observados localmente relevos de até um centímetro de altura e de uma possível origem microbiana. Frequentemente, podem ser vistas estruturas arqueadas do tipo tepee e camadas brechadas com intercalações tubulares. Os calcilutitos ocorrem fortemente associados a calcarenitos finos e grossos, apresentam cores creme e cinza, onde prevalecem laminações plano-paralela, estratificação cruzada do tipo hummocky, e

estratos cruzados de espessura decimétrica resultante da migração de marcas de onda de granulação grossa. Comumente observa-se estromatólitos colunares, intensamente associados a ambientes agitados sob a ação de ondas de tempo bom e de tempestades.

- Subunidade Sarandi: representada por calcarenitos oncólitos, peloidais e base de interclastos de cor cinza-escuro, e subordinadamente calcissiltitos que aparecem inclusos na Unidade Nova América. Como estruturas sedimentares ocorrem principalmente as laminações plano-paralela e estratificações cruzadas, essa subunidade é basicamente semelhante à Unidade Jussara.
- Subunidade Lapão: ocorrem associadas à essa subunidade rochas dolomitizadas e/ou silicificadas da Unidade Nova América, as quais podem ser representadas em escala de mapeamento. É de importância fundamental ressaltar os termos dolomíticos, pois os mesmos relacionam-se às ocorrências de depósitos econômicos de fosfato de chumbo e zinco da Bacia de Irecê.

4) Unidade Irecê: composta por camadas de calcilutitos e calcarenitos finos a médios de cor cinza-escuro a preta, apresenta espessura centimétrica, interpostas com margas e siltitos.

Entretanto, na região de estudo a Formação Salitre ocupa aproximadamente 72% da extensão territorial da BUU. E de acordo com CPRM (2003), a FS é representada nessa Bacia pelas Unidades: Gabriel e Nova América e Nova América subunidade Lapão (descritas acima) e ainda por coberturas detrítico lateríticas e aluvionares.

Na Bacia Una-Utinga (BUU), a (FS) ocorre sobreposta a Formação Bebedouro (FS), e essa bordeja totalmente a BUU, ou seja, nas porções marginais da Bacia (Figura 1.2.7). Guimarães e Pedreira (1990) ressaltam que a FS se encontra, sobreposta e em contato concordante com a Formação Bebedouro e discordantemente à Formação sobreposta Morro do Chapéu.

1.2.6 Aspectos Geomorfológicos regionais e locais

A geomorfologia do Grupo Bambuí é abordada em RADAM (1981) como Região do Bambuí, a qual abrange os relevos tabulares evoluídos sobre as rochas calcárias do Grupo Bambuí ou o Grupo Una, que pertence ao Supergrupo São Francisco. Geomorfológicamente, corresponde a unidade dos Pediplanos Carstificados, a qual junta regionalmente dois setores,

um ocidental e outro oriental, que abrange a parte leste da Chapada Diamantina. Este corresponde a sinclinais de dobramentos muito amplos e abertos, sobre os quais assentaram as rochas predominantemente calcárias, onde encontra-se a região que engloba a área de estudo.

Os Pediplanos Carstificados são uma unidade composta por uma grande faixa planáltica, que compõe o piemonte oriental da Chapada Diamantina. A maioria desses pediplanos localizam-se entre 400 e 800 metros de altitude, variando gradativamente, não apresentando grandes quebras de declives. RADAM (1981) ressalta que essa unidade se refere a um planalto em que basicamente a litologia é representada por afloramentos de rochas carbonáticas e conglomeráticas, respectivamente Formação Salitre e Bebedouro.

Ressalta ainda, que, os pediplanos carstificados topograficamente apresentam-se na forma tabular e por vezes irregular, configurando lombadas, de um planalto que no setor oriental apresenta um ligeiro basculamento para oeste em direção a Chapada Diamantina, finalizando a leste por escarpas descontínuas. Os interflúvios de topo de plano são as formas de relevo que acontecem comumente e apresentam-se ligeiramente inclinados, especialmente bordejando os rios, correspondentes a pediplanos formados em fase distintas e que se encontram em processo de dissecação ou destruídos pela erosão superficial, devido ao escoamento concentrado, bem como por processos de dissolução.

De forma incipiente, a dissecação entalha lombadas e colinas de vertentes, levemente convexo-côncavas que ocorrem nas superfícies com declives suaves no sopé das colinas, principalmente nas circunvizinhanças da borda do planalto. Revela-se ainda características de morfologia de carste encoberto, na forma de sumidouros e especialmente pequenas depressões fechadas e dolinas, bem como por vezes escarpas calcárias entalhadas com atributos ruiformes e feições de detalhes como lapiás e outras.

Destacam-se ainda morros de elevação residual e grutas que ocorrem nos limites dos planaltos, assim como os paredões esculpidos pelo rio Una. As porções de pediplanos mais conservadas do planalto são representadas sob formas de mesetas e foram descritos como pediplanos degradados inumados. O que resta dos pediplanos foi mapeado como carste coberto e exumado, nas porções caracterizadas por feições típicas de evolução do relevo em regiões calcárias.

Guimarães e Pedreira (1990), que realizaram estudos na folha Utinga, destacam como principal feição geomorfológica regional o planalto Bonito, onde as altitudes chegam em torno de 1000 metros. Ocorre ainda a Serra do Sincorá e outras serras que compõem o sistema

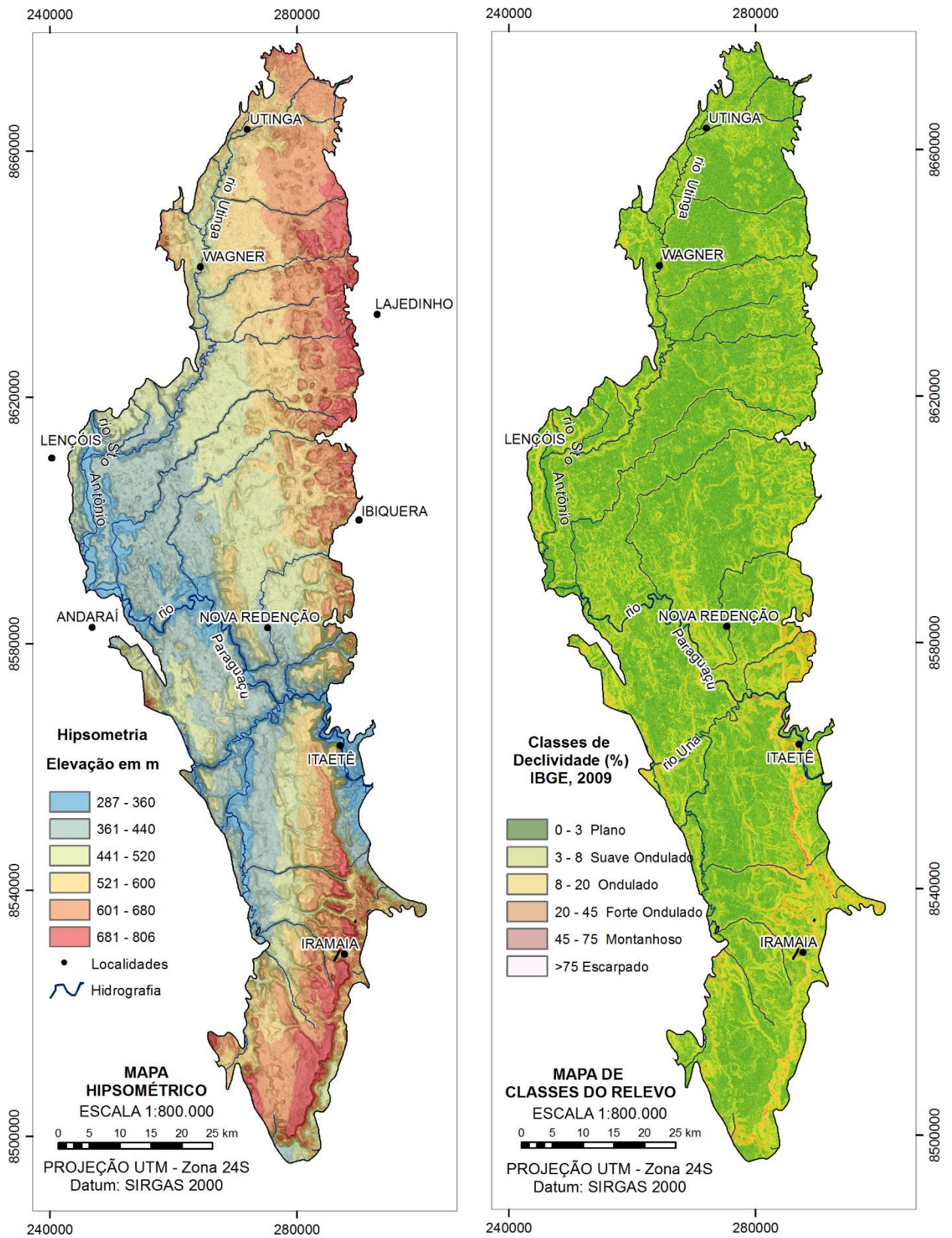
orográfico da Serra do Sincorá.

Localmente, segundo Pedreira (1994), a área de estudo da BUU compõe o domínio das bacias Carbonáticas, apresentando relevo suavemente ondulado a plano e altitudes que variam entre 500 e 600 metros. As classes de relevo propostas por esse autor corroboram a sistemática de classificação do relevo proposta pelo IBGE (2009), ilustrada na Figura 1.2.10.

É comum o desenvolvimento de relevo cárstico, formando várias grutas e dolinas, devido a maior precipitação atmosférica e circulação de água subterrânea na região. Segundo Bomfim e Pedreira (1990), a área integra o domínio geomorfológico do Vale do Paraguaçu, composto por planaltos pouco elevados e morros residuais com altitudes entre 350-600 metros.

A alteração intensa dos calcários permitiu o desenvolvimento de solos espessos, os quais mascaram a escultura cárstica. As formações que compõem representativamente a geologia da área podem ser apresentadas geomorfológicamente da seguinte forma: A formação Salitre, para Bomfim e Pedreira (1990), é uma unidade reconhecida através de um reflexo monótono pouco pronunciado, do qual se destacam morros, morrotes alinhados, sustentados por material dolomitizado e/ou silicificado e pelo desenvolvimento do solo espesso; a formação Bebedouro, para Guimarães e Pedreira (1990), tem como feição marcante a formação de uma planície a qual resulta do preenchimento e da erosão parcial, essencialmente cárstica, de uma depressão pré-existente do Grupo Chapada Diamantina. Ocorrem ainda pequenos morros sustentados por rochas dolomitizadas e/ou silicificadas.

Figura 1.2.10 - Representação da altitude e classificação do relevo na BUU



Fonte: Elaboração própria

1.3 OBJETIVOS

Para a execução desta pesquisa foi necessário elencar alguns objetivos, que foram divididos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos, apresentados a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar as características hidrogeológicas e mapear a vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre na área da Bacia Una-Utinga, na região central do Estado da Bahia, através de métodos de investigação hidrogeológica.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar os registros litoestratigráficos e morfoestruturais atuais, para indicar o cenário dos processos de carstificação;
- b) Identificar os elementos geológico-estruturais responsáveis pelo condicionamento da dinâmica de fluxo subterrâneo;
- c) Determinar os valores dos parâmetros hidráulicos do aquífero cárstico estudado com base em dados de teste de bombeamento de poços;
- d) Caracterizar a hidroquímica das águas subterrâneas e superficiais, com base na modelagem de dados físico-químicos e isotópicos;
- e) Mapear a vulnerabilidade natural do aquífero cárstico Salitre através da aplicação e comparação dos métodos COP e PI;
- f) Apresentar sugestões técnicas para subsidiar a gestão dos recursos hídricos e planejamento territorial – urbano, contribuindo para as políticas de gestão ambiental.

1.4 APRESENTAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A área onde essa pesquisa foi desenvolvida, a BUU, é uma das representantes das bacias neoproterozoicas intracratônicas do estado da Bahia. Trabalhos realizados por Pedreira e Margalho (1990) a define geotectonicamente como um sinclinal com vergência para oeste, bordejando parte do grupo Chapada Diamantina, especificamente a Serra do Tombador. Trabalhos realizados por Guimarães e Pedreira (1990), mapearam a área de estudo em escala

regional, definindo os principais representantes litológicos da região, a saber, a Formação Salitre e a Formação Bebedouro, onde a primeira abriga o aquífero cárstico Salitre da BUU, e está sobreposta a segunda, que bordejia toda a área.

A Formação Salitre abrange o aquífero cárstico homônimo na BUU carecendo de pesquisas nas áreas de hidrogeologia e vulnerabilidade.

Entretanto, alguns estudos foram desenvolvidos no aquífero cárstico Salitre, na bacia neoproterozoica de Irecê, cronocorrelata à BUU, e apresentaram resultados sobre hidroquímica, potencialidade, vulnerabilidade e riscos à contaminação do aquífero, realizados por: Bastos Leal & Silva (2004), Silva (2005), Santos (2008), Nossa (2011), Gasser (2017), Gonçalves (2017), Salles *et al.*, (2018), Santos (2017), Cunha (2018), assegurando variadas pesquisas realizadas nesta Bacia.

A potencialidade no aquífero cárstico Salitre, na bacia de Irecê, foi estudada por Gonçalves (2017), que compartimentou o aquífero com base em modelos geoestatísticos. A estimativa da produtividade através da capacidade específica e transmissividade, poderá contribuir com o conhecimento da potencialidade do aquífero cárstico Salitre na BUU.

A vulnerabilidade do aquífero Salitre na Bacia de Irecê foi estudada por Nossa (2011), que aplicou o método COP, apontando o grau de vulnerabilidade de moderada a baixa. A aplicação desse método, bem como do PI, poderá permitir a execução de mapas de vulnerabilidade da BUU, que poderão auxiliar no fornecimento de subsídios para a política de gestão de uso e ocupação do solo.

Diante da contextualização supracitada, essa pesquisa procurou responder o seguinte questionamento:

Quanto o aquífero cárstico Salitre é vulnerável à contaminação na região da BUU? Quanto a potencialidade, como apresenta-se na área de estudo? Como ocorre o comportamento dos isótopos ambientais, bem como da hidroquímica no aquífero cárstico Salitre?

Assim, partiu-se da hipótese de que os aquíferos cársticos ao mesmo tempo que são considerados intrinsecamente vulneráveis, também podem demonstrar considerável potencial hídrico.

O pioneirismo desse estudo, especialmente no que tange aspectos hidrogeológico e de vulnerabilidade na BUU, é essencial para despertar novos interesses em outros aspectos científicos, principalmente na gestão das águas subterrâneas, diante desta ser uma das principais fontes de suprimentos e águas dos municípios que compõem esta Bacia.

1.5 JUSTIFICATIVA

As regiões cársticas são consideradas como áreas de interesse econômico e hidrogeológico pois, na maioria das vezes, dispõem de solos agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e apresentam importância ambiental, principalmente pelas feições geomorfológicas resultantes da dissolução da rocha carbonática, como dolinas e sumidouros. Ficam, portanto, muitas vezes vulneráveis à contaminação antrópica, associada à fatores característicos deste tipo de ambiente como: baixa espessura dos solos, concentração de fraturamento e carstificação nas camadas superiores do aquífero, além da ocorrência de pontos de recarga em cavidades e condutos formados pelo processo de carstificação (GOLDSCHIEDER, 2002).

Estas regiões apresentam solos férteis e topografia pouco acidentada proporcionando atividades agrícolas, que são a fundamental atividade econômica, na qual o uso das águas subterrâneas é primordial na irrigação, devido a não abundante oferta de água superficial.

O selecionamento da área de estudo deve-se ao fato do aquífero cárstico Salitre na BUU não possuir nenhum estudo hidrogeológico e de vulnerabilidade, sendo esta pesquisa um instrumento explorador na região. Além do que, o sistema cárstico é um ambiente que intrinsecamente apresenta um elevado potencial de vulnerabilidade devido sua natureza composicional, resultando em estruturas como feições cársticas com variados graus de fraturamento, onde, muitas vezes, são desenvolvidas atividade antrópicas potencialmente contaminantes como agricultura irrigada com o uso de agrotóxicos, mineração, disposição inadequada de resíduos sólidos e ainda, à falta de saneamento nas áreas urbanas.

Os resultados desta pesquisa poderão auxiliar novos trabalhos e acessar as políticas públicas como ferramenta pioneira e incentivadora para o conhecimento dos dados, especialmente, hidrogeológicos na região central do semiárido baiano, na Chapada Diamantina.

1.6 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir estão apresentados os materiais e métodos aplicados em todas as etapas desta pesquisa passando pelas etapas de pré-campo, campo e pós campo que incluiu: análises laboratoriais (hidroquímicas e isotópicas), tratamento de dados, cálculo de capacidade específica, mapeamento das feições cársticas, método de vulnerabilidade, cruzamento entre vulnerabilidade e potencialidade.

1.6.1 Etapa de pré-campo, mapas e rotas

Esta etapa contou com as seguintes atividades: levantamento bibliográfico e cartográfico visando a busca de dados e informações disponíveis em livros, teses, artigos, periódicos científicos e outros; confecção de mapas preliminares como geológico e planimétrico, além da separação de todo material e equipamento usado em campo: GPS, martelo, bússola, caderneta de campo, máquina fotográfica, sonda multiparâmetro, frascos para amostragens de água específico para as amostragens químicas e isotópicas.

Antecipadamente, foi necessária uma visita ao banco de dados da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB), para a seleção dos poços tubulares (125 poços) na região de estudo e plotagem dos mesmos visando a definição prévia da malha de amostragens. Foram usadas imagens de satélite com resolução de 30 metros e mapa geológico ao milionésimo do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para a elaboração das representações planimétricas e hidrogeológica com direção de fluxo subterrâneo na escala de 1:150.000, com posteriores ajustes em campo.

Foram definidas estrategicamente as rotas a serem seguidas no percurso das amostragens, considerando as observações geológicas e geomorfológicas, visando melhor aproveitamento do tempo, analisando as dificuldades de vias de acesso na área de estudo. Assim, seguiu-se no sentido S-N, percorrendo percuso planejado, atravessando os doze municípios que inserem a Bacia Una-Utinga.

A etapa foi considerada crítica em se tratando de levantamentos de dados para o incremento da pesquisa, foi o momento de definir os dados indispensáveis que seriam base para as etapas seguintes, como o selecionamento da malha de amostragem, bem como a melhor forma de abranger toda a área de estudo devido a sua extensão territorial (5.026 km²), as análise físico-químicas a serem realizadas, orçamento dos laboratórios e escolha dos mesmos, bem como adequação para a realização dos procedimentos analíticos imprescindíveis, e finalmente a análise dos dados.

1.6.2 Etapa de Campo - amostragens

A campanha de campo ocorreu em setembro de 2015, onde foram realizadas as seguintes atividades: reconhecimento da área, observações geológicas e geomorfológicas, amostragens de 44 pontos de amostragens, abrangendo água de poços, nascentes e águas superficiais, onde foram efetivadas medidas *in loco* de parâmetros como pH, temperatura,

sólidos totais dissolvidos, Eh, condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido e salinidade (utilizando o medidor multiparâmetro *Multi Water Quality Checker U-50 Series*, fabricado pela HORIBA, o qual exibe os valores a partir de um leitor de led (Figura 1.6.1). As coletas foram realizadas conforme orientação dos laboratórios (para análises físico-químicas e isotópicas).

Foram analisadas águas de 35 amostras de poços para hidroquímica, sendo as demais: 02 pontos de águas superficiais, apenas com medidas de parâmetros físicos, 02 pontos de águas superficiais (AG001, PA32), 04 pontos de águas de nascentes (PA11,12,13 e 33) e 01 amostra de água para hidroquímica que quebrou o recipiente (PA02).

1.6.3 Análises em laboratório

As análises hidroquímicas foram realizadas no Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO) do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia.

1.6.3.1 Análises hidroquímicas

As análises hidroquímicas foram realizadas pelo LEPETRO do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, segundo os métodos recomendados por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMEWW)* (CLESCERI, GREENBERG & EATON, 1998).

Nas análises químicas das 35 amostras, a determinação dos cátions (Ca, Mg, Na, K) e ânions (Cl, N-NO₃ e SO₄) foi efetivada por meio de cromatografia iônica (CI), já a alcalinidade (HCO₃ e CO₃) foi realizada por titulação. Foram analisados 10 elementos maiores definidos para a classificação hidroquímica da área, e 17 amostras catalogadas no banco de dados da CERB, com dados para Ca, Mg, Na, K, Cl, N-NO₃, SO₄, CI e alcalinidade (HCO₃ e CO₃).

Para as amostragens realizadas através das bombas instaladas nos poços, fez-se necessário purgar a água em aproximadamente 20 minutos (Figura 1.6.2), a fim de tornar mínima a possibilidade de amostragem de água estagnada na tubulação, realizando assim, a atividade com maior acuidade para as melhores obtenções nos resultados analíticos, tanto dos parâmetros físico-químicos quanto isotópicos. Nas nascentes as amostragens foram efetuadas verificando o local mais preservado da área.

Figura 1.6.1 - Medidor (sonda) multiparâmetro.
8555166 mN/0271302 mE/ 24L



Fonte: Aatoria própria

Figura 1.6.2 - Purgagem da água do poço.
8512063 mN/0288208 mE/ 24L



Fonte: Aatoria própria

Figura 1.6.3 - Filtragem de amostra para análise química.
8510833 mN/292938 mE/24L



Fonte: Aatoria própria.

Figura 1.6.4 - Conjunto millipore, com filtros.
8510833 mN/292938 mE/24L



Fonte: Aatoria própria.

Figura 1.6.5 - Frasco de 500ml - análise química.
8541132 mN/288614 mE/24L



Fonte: Aatoria própria.

Figura 1.6.6 - Frasco de 100ml - análise química.
8541132 mN/288614 mE/24L



Fonte: Aatoria própria.

As amostras direcionadas para análises químicas, cátions (Ca, Mg, Na, K) e ânions (Cl, N-NO₃⁻ e SO₄), seguiram a metodologia supramencionada baseada em SMEWW (CLESCERI, GREENBERG & EATON, 1998); foram filtradas em conjunto Millipore (Figura 1.6.3), com filtros de 0,45 µm (Figura 1.6.4) e os frascos de 500 ml de volume (Figura 1.6.5) vedados e acondicionados sob refrigeração para posterior encaminhamento ao laboratório.

1.6.3.2 Análises isotópicas

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA-CPGG/IF-UFBA). Para as análises isotópicas (²H e ¹⁸O) seguiram as metodologias determinadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002). Onde a amostragem deve ser efetivada, de forma que não ocorra evaporação ou difusão do vapor de água e/ou troca isotópica com o ambiente em torno, e com o frasco de acondicionamento; e deve ser evitada a formação de bolhas. O recipiente deve ser de vidro de cor âmbar com 100 ml de volume (Foto 1.6.6).

Das 44 amostras coletadas, 40 destas de águas de poços, nascentes e água superficial), foram para análises isotópicas. As outras 04 amostras foram: 02 amostras de água para isótopos que quebraram (PA 06 e 11) e 02 amostras onde foram analisados parâmetros físicos-químicos. As coletas das águas seguiram a orientação do laboratório, quanto a forma de amostragem, bem como acondicionamento, que foi sob refrigeração.

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, foram efetuadas a partir do sistema de espectrometria de massas composto por: um espectrômetro de massas de razão isotópica - MS *Finnigan MAT Delta Plus* e um reator automático H - *Device Thermo Quest Finnigan*.

O equipamento utilizado para tais análises comporta um espectrômetro da PICARRO modelo L2120, para análise de isótopos da água composto por uma abertura ressonante tipo *ring-down* de 25 cm, formada por três espelhos altamente reflexivos com comprimento óptico efetivo em torno de 25 km e uma fonte de laser operando próximo de 1.39µm. As aberturas devem ser sequencialmente limpas e evacuadas e estas injetadas em um vaporizador mantido a 110°C. O vapor de água mistura-se com o N₂, no vaporizador, formando uma mistura homogênea por um tempo de 90 segundos, essa mistura é enviada ao analisador a um fluxo constante de 30 mL/min.

1.6.4 Tratamento de dados

Os dados analíticos e físico-químicos foram organizados em planilhas do *software* Excel 2013, as quais foram salvas em formatos de entrada dos *softwares* *Qualigraf* 2017 e ArcGIS 10.5. Os dados processados no *Qualigraf* foram plotados no ArcMap resultando nos mapas de fácies hidroquímicas, bem como classificação de salinidade.

Utilizou-se o diagrama de Gibbs (GIBBS,1970), que é representado pelas concentrações de STD e pela relação iônica $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$, visando identificar os processos ambientais pertinentes a influência da precipitação meteórica (pluviosidade), interação água rocha (dissolução) e evaporação (salinização) das águas (REDWAN *et al.*, 2016).

Para a análise da salinidade em função dos Sólidos Totais Dissolvidos - STD, foram utilizados os valores de referências da Resolução CONAMA 357/2005, Resolução CONAMA 396/2008 e WHO (2003) para enquadramento de classes. Muito embora a Resolução CONAMA 357/2005, seja aplicada para águas superficiais, diante da restrição que confere essa Resolução, optou-se por aplica-la às águas coletadas em todos os pontos (nascente, poços e águas superficiais) da BUU.

Para o tratamento isotópico foram utilizados os *softwares* Excel 2013 e OriginPro 8.5, que resultaram na reta meteórica global. Os valores de razão isotópica foram igualmente especializados no ArcMap.

1.6.5 Cálculo da capacidade específica e da transmissividade

Verificou-se que de 125 poços existentes na BUU, (com diversos dados incompletos), apenas em 94 poços pode-se determinar o valor de Capacidade Específica (S_c), e em 35 poços destes 94 poços, constatou-se a existência de dados de ensaios de rebaixamento e recuperação completos, satisfazendo a aplicação do método de Theis (1935).

Para calcular a capacidade específica nos poços, foi utilizada a Equação 1 a seguir.

$$S_c = \frac{Q}{S_w} \quad (1)$$

Onde S_c [L^2/t] é a capacidade específica, Q [L^3/t] é a vazão e S_w [L] é o rebaixamento medido no poço. Essa expressão foi aplicada à cada um dos 94 poços na área da

BUU com informações completas de vazão e rebaixamento.

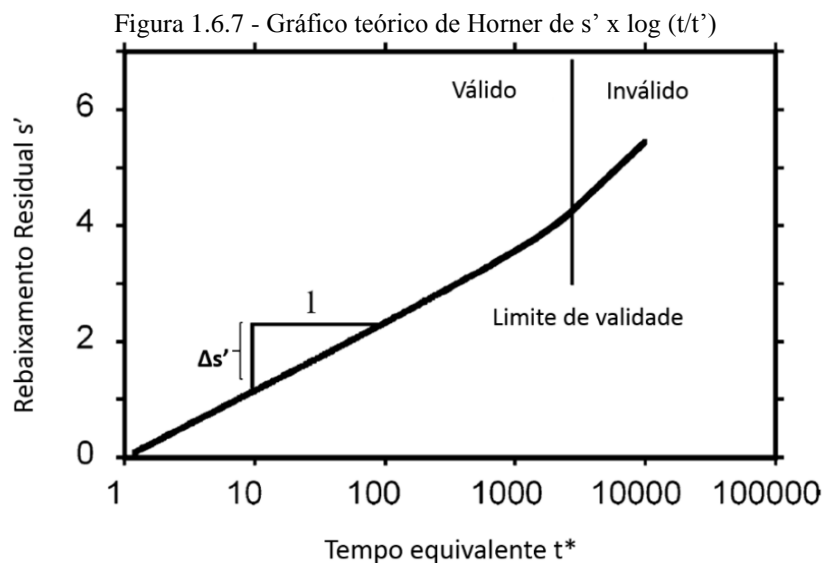
Para o cálculo da transmissividade analítica (Equação (2)), foi usado o método de interpretação gráfico da recuperação de Theis (1935) em 35 ensaios dos poços com testes de rebaixamento e recuperação completos retirados da lista inicial dos 94 poços da BUU oriundos do cadastro da CERB. Utilizou-se a Equação 2 a seguir.

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta m} \quad (2)$$

Onde $T [L^2/t]$ é a transmissividade, $Q [L^3/t]$ e Δm é um fator oriundo do ajuste gráfico de cada ensaio de bombeamento.

Realizou-se o ajuste gráfico (THEIS, 1935) de cada um dos 35 ensaios dos poços, bem como a análise dos dados de S_c e T no software Excel 2013, onde foi possível realizar considerações estatísticas univariadas e bivariadas, assim como, transformadas logarítmicas e operações algébricas.

Os valores da recuperação (s') e o logaritmo da taxa de tempo equivalente $\log(t/t')$ são plotados no gráfico ($s' \times \log(t/t')$) conhecido como “gráfico de Horner” (Figura 1.6.7), elaborado para cada um dos 35 poços com ensaio de bombeamento, onde é calculada a tangente Δm entre esses dois parâmetros.



Fonte: Willmann *et al.* (2007).

Em posse do conjunto de 35 valores de transmissividade calculados pelo método analítico da recuperação de Theis (1935), optou-se por elaborar um modelo empírico para

calcular a transmissividade empírica “ $T_{empírica}$ ” em função de Sc .

Para a construção do modelo empírico foi aplicado o modelo de regressão linear – MRL, utilizando os dados de transmissividade analítica e capacidade específica (35 valores de cada) de acordo com o que prevê o modelo na Figura 1.6.8.

Figura 1.6.8 - Concepção do modelo empírico correlacionando os termos, Transmissividade -T e Capacidade Específica - Sc , pelo seu Log

$$\begin{aligned} \text{Log}(T_{analítica}) &= \left(\frac{2.3Q}{4\pi\Delta m} \right) \leftrightarrow \text{Log}(Sc_{analítica}) = \frac{Q}{S} \\ T_{empírica} &= 10^{b_0} * Sc^{b_1} \end{aligned}$$

Fonte: Elaboração própria.

Onde b_0 é o coeficiente linear e b_1 o coeficiente angular da reta de regressão. A expressão $T_{empírica} = 10^{b_0} * Sc^{b_1}$ é o resultado da regressão. Através dessa expressão empírica, foram aplicados os valores de capacidade específica (Sc), resultando em novos valores de $T_{empírica}$ para os outros 59 dados de Sc dos poços na BUU, além de recalcular para os 35 dados de $T_{analítica}$ iniciais, somando assim 94 valores finais de $T_{empírica}$.

A partir da obtenção dos dados de $T_{empírica}$, executou-se a espacialização dos dados. Utilizou-se o método da Krigagem Ordinária – KO, o qual auxiliou na espacialização dos dados da transmissividade.

Utilizando o variograma, caracterizou-se o valor médio do quadrado das diferenças entre os blocos pares de pontos regionalizados, presentes na BUU, através de uma distância “ h ” entre os pares de dados.

Portanto, em um comportamento característico de variograma ajustado, o valor da variância aumenta na proporção que acresce a distância de separação entre os pares, até atingir o patamar máximo (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989), conforme a Equação 3.

$$Y(h) = \left\{ \left[\frac{1}{2n} \sum (x_{i+h} - x_i) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

Onde, h = patamar ou alcance máximo, X_i = ponto amostrado e X_{i+h} = ponto interpolado.

Fabbri (1997), Razack e Lasm (2007), apontam a krigagem ordinária como o melhor método para interpolar dados hidrogeológicos. Trata-se de um método localizado em

que estima em um ponto, não amostrado, o resultado da combinação linear de dados verificados em sua vizinhança. Assim, o estimador da KO é dado por Z^* , segundo a Equação 4.

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (4)$$

Com a aquisição dos valores de $T_{empírica}$, possibilitou-se a variografia e espacialização com o uso dos seguintes softwares: *Stanford Geostatistical Modeling Software* – SGeMS e o *Geostatistical Analyst Tools* – ArcMap / ArcGis 10.1, respectivamente. Assim, foi criado o modelo espacial de $T_{empírica}$.

1.6.6 Metodologias de mapeamento das feições cársticas e lineamentos estruturais

A aquisição das feições cársticas na Bacia Una-Utinga - BUU, foi feita através de reconhecimento em campo, bem como pela aerofotointerpretação geológica de imagens *Landsat* e *Rapideye* e por meio de processamento do Modelo Digital de Elevação - MDE, a saber: i) modelo de declividade e, ii) modelo de relevo sombreado (*hillshade*).

Para tanto, se utilizou do software ArcGIS 10.5, módulo ArcMap, com o traçado de todas as depressões fechadas, tanto as aerofotointerpretadas, quanto aquelas cadastradas em campo e no sistema CECAV (2017) para tratamento dos dados e confecção de todos os mapas (declividade, dolinas, lineamentos estruturais e o mapa de índice cárstico - IC).

1.6.6.1 O mapa de declividade

O mapa de declividade foi gerado pelo processamento do modelo digital de elevação, capturado da imagem MDE ASTER. A aplicação desse mapa foi essencial para o reconhecimento e interpretação das depressões fechadas, evitando a incorporação de falsas feições, como áreas com pivôs centrais, bem como áreas com cercado, que podem ser confundidas. Este mapa foi confrontado com as feições cársticas (dolinas) encontradas em campo e foram reconhecíveis, corroborando com a acuidade deste mapa.

1.6.6.2 O mapa de dolinas e lineamentos estruturais

Estes mapas foram gerados pelos processamentos (das imagens ASTER MDE) gerando o modelo *hillshade* com iluminação à N45° e N90°. As feições foram vetorizadas,

sendo que para as dolinas foram definidos pontos. As imagens foram aerofotointerpretadas e confrontadas com o mapa de declividade e imagens de satélite, para melhor acuidade dessas feições.

O mapa de lineamentos estruturais também foi gerado pelos processamentos supramencionados, sendo realizada a aerofotointerpretação dos lineamentos estruturais. É válido ressaltar que, tanto para o mapa de dolinas como o de lineamentos estruturais, a aplicação do *hillshade* foi fundamental para melhor interpretação dos dados nas imagens de satélites, já que o *hillshade* permite realçar melhor a expressão do relevo.

1.6.6.3 Mapeamento da Intensidade da Carstificação ou Índice Cárstico

Este mapeamento foi aplicado na BUU com a intenção de verificar o quanto a área de estudo apresenta-se carstificada. Assim, adaptou-se a metodologia de M. M. Radulovic', apresentada em Stevanovic (2015).

A intensidade do índice de carstificação, definido como IC, considerou a densidade de feições morfoestruturais (falhas, fraturas, vales cegos, eixos de dolinas etc.) e as feições cársticas circulares (dolinas e uvalas).

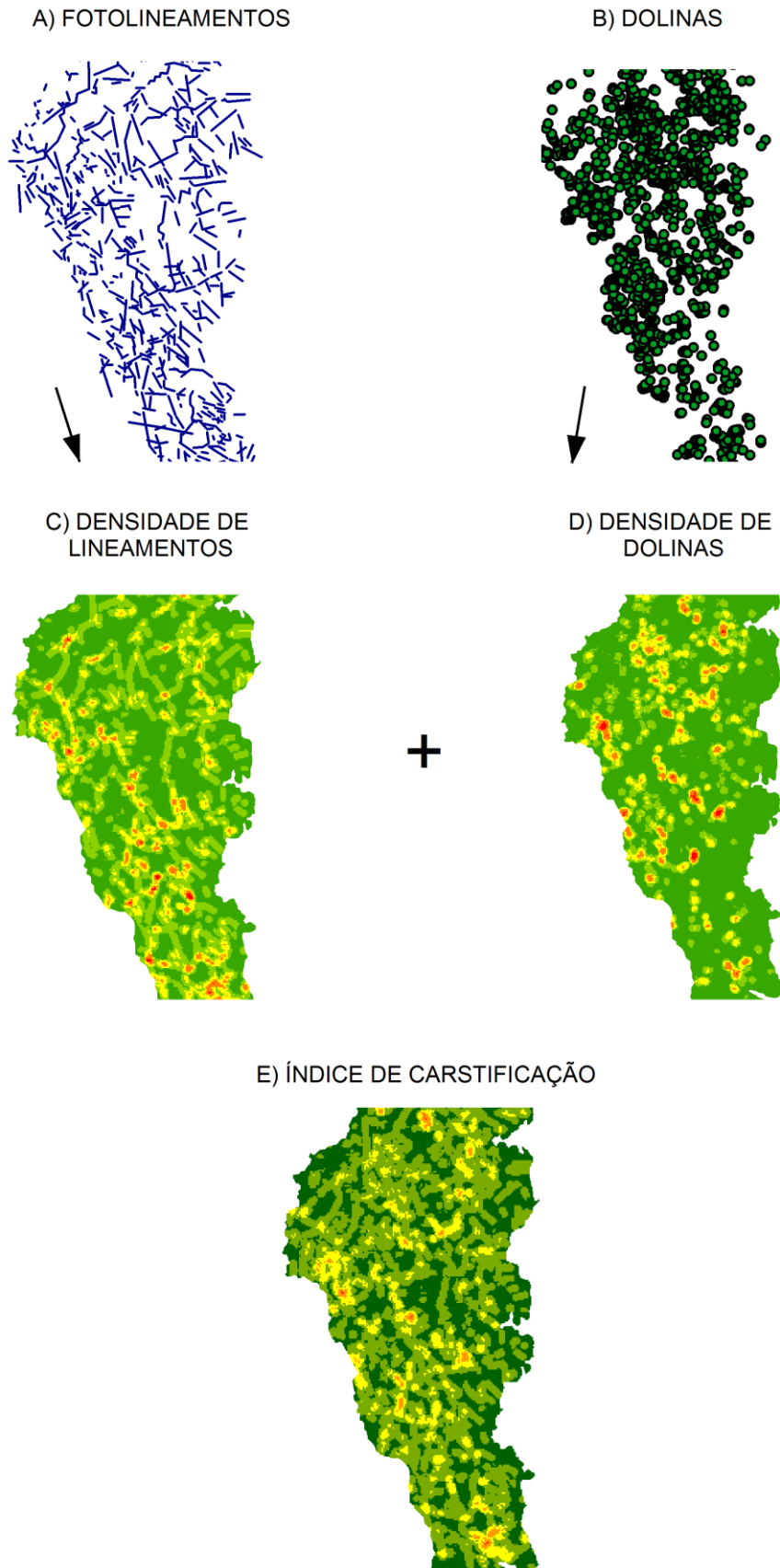
O modelo de densidade das feições cársticas foi elaborado a partir da adaptação da técnica de Radulovic', Stevanovic' e Radulovic' (2012), que aplicou em estudo de caso na parte sudeste dos Alpes Dináricos, no território do Montenegro, onde usou a técnica remota para delineamento de zonas carstificadas.

Em se tratando da BUU, as feições vetoriais (Vetorização das feições lineares estruturais A e B na Figura 1.6.9) foram transformadas em informações de densidade de linha e de ponto no espaço, apresentado como raster de densidade de pontos e outro de densidade de linha observados em C e D na Figura 1.6.9. Esses modelos foram gerados utilizando as ferramentas *line density* e *point density* do ArcMap 10.5.

Assim, para a BUU foram originados dois mapas, um de densidade de feições cársticas superficiais (dolinas e/ou uvalas) e outro de densidade lineamentos de estruturais (falhas e/ou fraturas).

Os modelos de densidade de dolinas e densidade de lineamentos estruturais são a espacialização do fator F_s , feições superficiais como dolinas e uvalas, e do fator L_e , lineamento estrutural como fraturas e falhas, respectivamente. O IC é o somatório desses fatores (F_s+L_e) o qual foi executado por meio da ferramenta *raster calculator* (ArcMap 10.5).

Figura - 1.6.9 Metodologia da transformada do dado vetorial para o dado raster



Fonte: Elaboração própria.

1.6.7 Métodos de vulnerabilidade

Foram selecionados dois métodos de avaliação da vulnerabilidade para serem aplicados à área de estudo: COP e PI.

A aplicação dos métodos utiliza fatores ambientais aplicáveis ao sistema de aquífero cárstico. Os fatores se subdividem em parâmetros, analisados e transformados em valores geoespaciais, que são correlacionados por operações matemáticas. O resultado da avaliação se apresenta sob a forma de mapa, que é categorizado em índices de vulnerabilidade.

Em ambos os métodos foram necessárias adaptações na determinação dos valores dos parâmetros, justificadas pela disponibilidade ou pelo formato dos dados obtidos para a área.

1.6.7.1 Método COP

O método COP foi desenvolvido por Vías *et al.* (2002, 2006), do *Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga – GHUMA*, sendo testado inicialmente em duas áreas de aquífero cárstico na Espanha. De acordo com Daly *et al.* (2002) e Goldscheider e Popescu (2004), o COP tem base nas premissas da abordagem europeia e foi mais divulgado a partir da Ação Europeia COST 620 (ZWHALEN, 2004).

O termo COP é um acrônimo dos fatores que devem ser considerados na sua aplicação, a saber: concentração de fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P). A seguir, um resumo dos conceitos utilizados em cada fator, como apresentado pelos autores no artigo original do método (VÍAS *et al.*, 2002).

- **Fator C**

O Fator C avalia a redução da proteção que a concentração do fluxo confere à área analisada. A característica de concentração de fluxo é dada pela condição da infiltração da água de recarga do aquífero e possíveis contaminantes que ela pode carregar. Assim, esse fator considera, em dois cenários, os parâmetros superficiais que configuram o percurso que a água faz até encontrar o aquífero. O resultado é apresentado no mapa do Fator C.

O cenário 1 observa as áreas que apresentam sumidouros e suas respectivas bacias de recarga. São áreas onde o fluxo é naturalmente concentrado e a água acessa o aquífero através de feições cársticas superficiais, que praticamente subtraem a existência de uma zona não-

saturada, composta de solos, sedimentos e rochas que contribuem para a proteção do aquífero.

Para esse cenário são examinadas as distâncias horizontais até os sumidouros (dh), as distâncias até os vales cegos (ds) (cursos d'água que terminam em sumidouros), e a declividade correlacionada ao grau de cobertura vegetal (sv). O produto desses parâmetros gera um escore C para as áreas do cenário 1.

$$\text{Escore } C = dh \cdot ds \cdot sv$$

Todo terreno que não se enquadra no cenário 1 é considerado no cenário 2. São então áreas de fluxo e infiltração difusos, pois as feições cársticas de concentração de fluxo estão ausentes ou menos evidentes. Esse cenário avalia as camadas superficiais (sf) e também a declividade combinada com a cobertura vegetal (sv).

O parâmetro (sf) correlaciona a ausência, permeabilidade ou impermeabilidade de camadas que sobrepõem o aquífero com as características da carstificação de superfície, em relação ao desenvolvimento do carste ou mesmo a presença de terrenos não-cársticos. O produto desses parâmetros gera um escore C para as áreas do cenário 2.

$$\text{Escore } C = sf \cdot sv$$

Juntos, os cenários 1 e 2 cobrem toda a área em estudo e através dos escores obtidos originam o mapa do Fator C.

- **Fator O**

O Fator O exprime o valor de proteção dado pelas camadas que sobrepõem o aquífero, seja solo, rocha não-cárstica ou mesmo a rocha cárstica não saturada. São consideradas as propriedades de textura e espessura do solo, além da granulometria/composição e fraturamento das rochas (ly), bem como a espessura (m) dessas camadas. Esse fator também julga a característica de confinamento do aquífero (cn). O resultado é apresentado no mapa do Fator O.

Textura e espessura do solo são combinadas no subfator (Os). O subfator de litologia (OL) gera um índice de camadas que corresponde ao somatório de todas as camadas que sobrepõem o aquífero e suas características já mencionadas. Esse índice é multiplicado pelo confinamento.

$$O_L = \left[\sum (ly. m) \right] . cn$$

A soma de O_S e O_L gera o escore O, que origina o mapa do Fator O.

- **Fator P**

O Fator P também retrata a redução da proteção, mas, nesse caso, condicionada pelas características da precipitação. Assim como no Fator C, em P a redução de proteção se resume na forma e intensidade da infiltração, difusa ou concentrada, a depender da quantidade de chuva e das particularidades do terreno, analisadas em C.

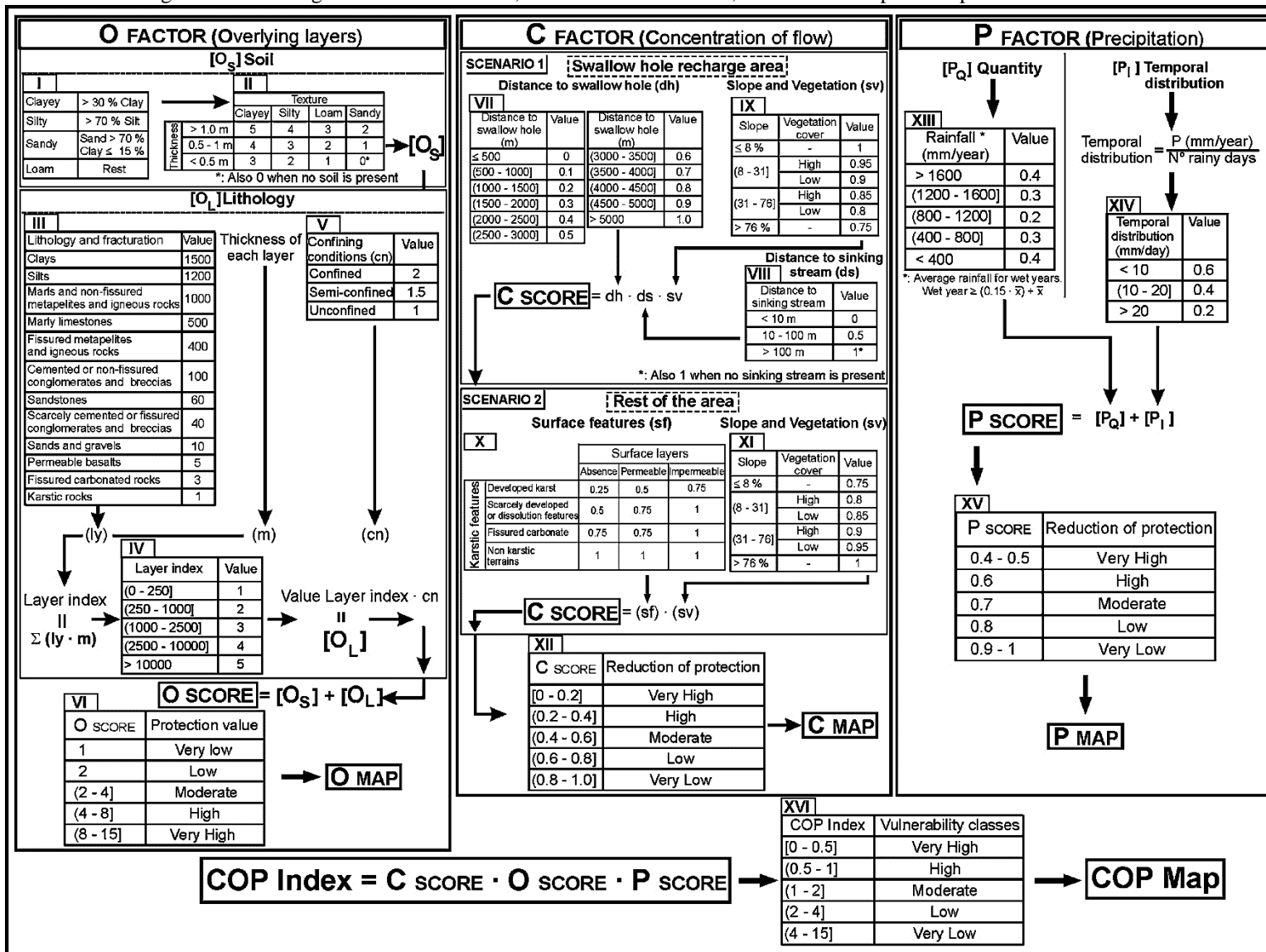
São analisados dois subfatores, (P_Q) e (P_I). O primeiro trata da quantidade de chuva em (mm/ano) do período analisado. Levanta-se a média de chuva para os chamados “anos úmidos”. O segundo subfator considera a distribuição temporal da chuva: a quantidade de chuva em (mm/ano) dividida pelo número de dias em que choveu. A soma de (P_Q) e (P_I) gera o escore P, representado pelo mapa do Fator P.

A combinação dos fatores C, O e P, através do seu produto, gera o índice COP de vulnerabilidade cujo mapa é categorizado em cinco classes de vulnerabilidade, de muito baixa a muito alta.

A figura 1.6.10 apresenta o diagrama do método COP, que mostra as orientações seguidas, em tabelas e fórmulas, para se obter o resultado, um mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquífero.

Na área estudada os dados necessários foram obtidos de acordo com as referências resumidas na tabela 1.6.1. Para o Fator C, criou-se um mapa de feições cársticas, através da interpretação de imagens de satélite Landsat e Rapideye diversas. A partir dessas feições verificou-se as distâncias requisitadas pelo método, até os sumidouros e vales-cegos. O banco de dados de cavernas do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE disponível no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV, 2017) foi utilizado como informação adicional na avaliação da carstificação da superfície do terreno.

Figura 1.6.10 - Diagrama do método COP, mostrando os fatores O, C e P e seus respectivos parâmetros considerados.



Fonte: Vías et al. (2002).

A declividade foi analisada e classificada nas categorias do método a partir do modelo gerado com a imagem ASTER-GDEM (2011). E a separação das áreas de cobertura vegetal alta ou baixa, conforme o método, foi possível baseando-se no mapa de uso e ocupação do solo do INEMA (2014). Como existem diferenças entre a vegetação proposta no método e a área estudada (caatinga, naturalmente esparsa), considerou-se cobertura vegetal natural ou antropizada, já que o regime de infiltração em relação à vegetação também é afetado conforme sua natureza.

A análise dos parâmetros das camadas que sobrepõem o aquífero foi feita, para o subfator (O_s) a partir do mapa de solos (INEMA, 2014) e dos perfis de perfuração de poços (CERB, 2013), que permitem estimar a espessura dos solos devido a extensão da área estudada. E o subfator (O_L) foi classificado conforme o mapa geológico da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), de autoria de Souza *et al.* (2003), além das observações feitas em campanha de campo.

Os dados de precipitação e distribuição temporal das chuvas foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019). Para a área, selecionou-se 08 estações pluviométricas, considerando o período de 2009 a 2013 devido à disponibilidade de todas as informações necessárias. Os dados foram tratados através do método de triangulação de Thiessen, que apresentou um mapa com áreas geometrizadas, em consequência da distribuição irregular das estações ao longo da área.

Tabela 1.6.1 - Dados utilizados nos fatores C, O e P e respectivas referências

Fator C		Fator O		Fator P	
<i>Subfator</i>	<i>Referência</i>	<i>Subfator</i>	<i>Referência</i>	<i>Subfator</i>	<i>Referência</i>
dh – distância até sumidouro	Interpretação própria	O_s – solo	INEMA (2014) CERB (2013)	P_Q – quantidade	INMET (2019)
ds – distância até vale cego	Interpretação própria	O_L – litologia	Souza <i>et al.</i> (2003)	P_T – distribuição temporal	INMET (2019)
sv – declividade e vegetação	INEMA (2014) ASTER-GDEM (2011)				
sf – feições de superfície	Interpretação própria CECAV (2017)				

Fonte: Elaboração própria.

1.6.7.2 Método PI

Do mesmo modo que o método COP, o método PI foi também desenvolvido no âmbito da Ação Europeia COST 620 (ZWHALEN, 2004). De autoria de Goldscheider *et al.* (2000), foi concebido pelo *Department of Applied Geology in Karlsruhe – AGK* em cooperação com o *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources in Hanover – BGR* (ZWHALEN, 2004).

O termo PI é um acrônimo dos dois fatores considerados na sua aplicação: cobertura de proteção (P) e condições de infiltração (I). Conceitualmente, esses dois são semelhantes aos fatores O e C do método COP. A seguir, um resumo dos conceitos utilizados em cada fator, como apresentado pelos autores no artigo original do método (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000).

- **Fator P**

O Fator P analisa a eficácia da proteção conferida pelas camadas que sobrepõem o aquífero. A proteção, basicamente, é resultado da combinação das características de espessura (M) e granulometria/composição (S e L) das camadas. Por camadas, o método considera: o solo (como a superior até 1 m de profundidade), o subsolo (solo/sedimento abaixo de 1 m) e as rochas da zona não-saturada, sejam cársticas ou não.

Para o cálculo de P também são levados em conta os parâmetros de condutividade hidráulica do solo (T), recarga (R), grau de fraturamento (F) e pressão artesianas do aquífero (A). Combinados, esses parâmetros são aplicados na fórmula da Função Protetora Total (P_{TS}), onde (B) é o produto da composição das rochas (L) e o fraturamento (F).

$$P_{TS} = \left[T + \left(\sum_{i=1}^m S_i \cdot M_i + \sum_{j=1}^n B_j \cdot M_j \right) \right] \cdot R + A$$

O escore P_{TS} resulta no Fator P, dividido em cinco classes, e convertido no mapa P, da eficácia de proteção da cobertura do aquífero.

- **Fator I**

O Fator I descreve as condições de infiltração do terreno onde se localiza o aquífero.

Ou seja, analisa o grau em que a cobertura de proteção é transpassada (do inglês *bypassing*) em resposta à concentração de fluxo na superfície ou subsuperfície.

Se a infiltração ocorre de forma difusa, sem concentração, o Fator I tem valor 1. Se, pelo contrário, ocorre concentração e as camadas de cobertura são transpassadas facilmente, pela existência de fraturas ou sumidouros, o valor de I é 0. Às áreas intermediárias entre essas situações são conferidos valores entre 0 e 1 a depender dos subfatores analisados.

Para se obter o valor de I segue-se três passos. No primeiro, determina-se as propriedades do solo em termos de condutividade hidráulica saturada e profundidade até uma camada de menor permeabilidade, categorizando os solos em seis tipos. O segundo passo determina o fator I' a partir da correlação entre os tipos de solo previamente definidos, a declividade do terreno e o uso do solo (floresta, campos e pastos ou construções). Por fim, o terceiro passo, que, com base no valor I', atribui novos valores à superfície em detrimento do mapeamento prévio das áreas de captação de sumidouros. Esse valor final é especializado no mapa do fator I.

O fator de proteção final é dividido em cinco classes de vulnerabilidade (de muito baixa a muito alta), espacialmente representadas no mapa PI e dado pelo produto dos fatores P e I.

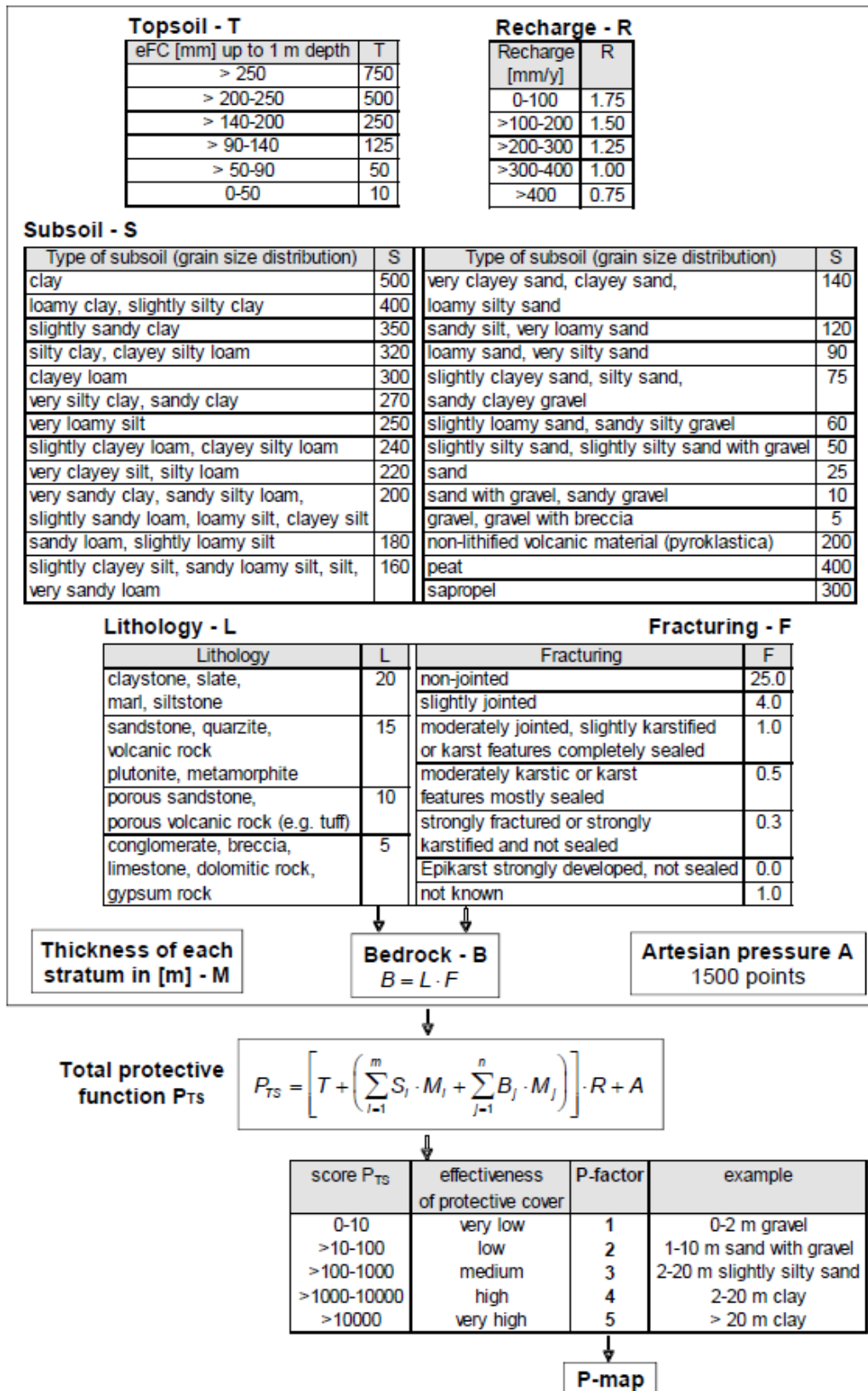
$$\pi = P.I$$

As figuras 1.6.11 e 1.6.12 apresentam o esquema de determinação dos fatores P e I dados pelo método. Na área da BUU os dados necessários foram obtidos e adaptados de acordo com as referências resumidas na tabela 1.6.2. Para o Fator P, subfator (*T*) utilizou-se o mapa de solos (INEMA, 2014) e consultas a trabalhos de capacidade de campo em outras áreas do Bambuí ou em tipos de solos semelhantes, em Goiás e Minas Gerais, como Mingoti *et al.* (2016). Essa adaptação fez-se necessária devido à impossibilidade de se analisar, para este trabalho, os parâmetros de solo necessários à aplicação do método. Para dados de recarga, subfator (*R*), também se consultou a base de dados do INMET (2019). Entretanto, foram utilizados os dados de 05 estações pluviométricas, que atendiam as atribuições, entre 2016 e 2019.

Os subfatores (*S*) e (*L*) foram analisados a partir do mapa geológico da Bahia de autoria de Souza *et al.* (2003), além das observações feitas em campanha de campo. O fraturamento (*F*) foi categorizado conforme o mapa de feições cársticas criado previamente e dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) disponível no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV, 2017). E a espessura das camadas

(M), como no método COP, obtida por inferência dos perfis de perfuração de poços (CERB, 2013).

Figura 1.6.11 - Diagrama do método PI, mostrando o fator P e seus respectivos parâmetros considerados.



Fonte: Goldscheider *et al.* (2000).

Os dados de condutividade hidráulica saturada do solo, como já observado, foram adaptados de trabalhos em solos semelhantes, como o de Barbalho e De Campos (2010). A declividade foi analisada e classificada nas categorias do método a partir do modelo gerado com a imagem ASTER-GDEM (2011). E a separação das áreas de cobertura vegetal em floresta ou pastagem foi possível baseando-se no mapa de uso e ocupação do solo do INEMA (2014). Nesse caso, considerou-se “floresta” as áreas de vegetação natural de maior densidade.

Finalmente, as áreas de superfície de recarga, ou captação, dos sumidouros foram interpretadas por meio do mapa de feições cársticas desenvolvido neste trabalho, com auxílio de imagens de satélite e também do banco de dados do cadastro nacional de cavernas (CECAV, 2017).

Figura 1.6.12 - Diagrama do método PI, mostrando o Fator I e seus respectivos parâmetros considerados.

1st Step: Determination of the soil properties

		Depth to low permeable layer		
		< 30 cm	30-100 cm	> 100 cm
Saturated hydraulic conductivity [m/s]	> 10 ⁻⁴	Type D	Type C	Type A
	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴		Type B	
	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁵	Type E		
	< 10 ⁻⁶	Type F		

2nd Step: Determination of the I'-factor

Landuse: Forest			
Soil properties	Slope		
	< 3.5 %	3.5 - 27 %	> 27 %
Type A	1.0	1.0	1.0
Type B	1.0	0.8	0.6
Type C	1.0	0.6	0.4
Type D	0.8	0.6	0.4
Type E	1.0	0.6	0.4
Type F	0.8	0.4	0.2

Landuse: Field/Meadow/Pasture			
Soil properties	Slope		
	< 3.5 %	3.5 - 27 %	> 27 %
Type A	1.0	1.0	0.8
Type B	1.0	0.6	0.4
Type C	1.0	0.4	0.2
Type D	0.6	0.4	0.2
Type E	0.8	0.4	0.2
Type F	0.6	0.2	0.0

Settlements: I' = 0.8

3rd Step: Determination of the I-factor

Surface Catchment Map	I'-factor					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
swallow hole, sinking stream, 10 m buffer	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100 m buffer	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
catchment of sinking stream	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0
rest of the area	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0

↓
I-map

Fonte: Goldscheider *et al.* (2000).

Tabela 1.6.2 - Dados utilizados nos fatores P e I e respectivas referências

Fator P			Fator I	
<i>Subfator</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Referência</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Referência</i>
T – solo superior	Capacidade de campo do solo (mm)	INEMA (2014) Mingoti <i>et al.</i> (2016)	Condutividade hidráulica saturada do solo (m/s)	Barbalho & De Campos (2010)
R – recarga	Recarga (mm/ano)	INMET (2019)	Uso do solo	INEMA (2014)
S – subsolo	Distribuição granulométrica	Souza <i>et al.</i> (2003)	Declividade (%)	ASTER-GDEM (2011)
L – litologia	Tipo de rocha		Superfície de Recarga (mapa)	Interpretação própria CECAV (2017)
F – fraturamento	Desenvolvimento do carste	Interpretação própria CECAV (2017)		
M – espessura	Espessura de cada camada (m)	(CERB, 2013)		

Fonte: Elaboração própria.

1.6.8 Correlação entre vulnerabilidade e potencialidade

Para indicar a potencialidade do aquífero Salitre na BUU utilizou-se os dados de transmissividade (T) que foram determinados empiricamente a partir da capacidade específica (Sc).

Realizou-se a comparação entre os domínios de transmissividade encontrados no aquífero cárstico Salitre na BUU com as classes de vulnerabilidade exibidas pelos métodos PI e COP. Diante do resultado da comparação, foi constatada a necessidade de uma inferência espacial para melhor acurácia da relação entre a vulnerabilidade e a T do aquífero Salitre na BUU.

Assim, o método booleano foi o aplicado para o cruzamento de cada mapa dos métodos de vulnerabilidade com o mapa de domínios de transmissividade. Para isso fez-se a separação em valores de “0” e “1”.

(i) Os domínios de transmissividade alta e muito alta foram agrupados em “1” e os domínios de transmissividade baixa e moderada foram reclassificadas para “0”. (ii) As classes de vulnerabilidade, moderada, alta e muito alta foram agrupadas em “1” e as classes de vulnerabilidade baixa e muito baixa foram agrupadas em “0”.

CAPÍTULO 2

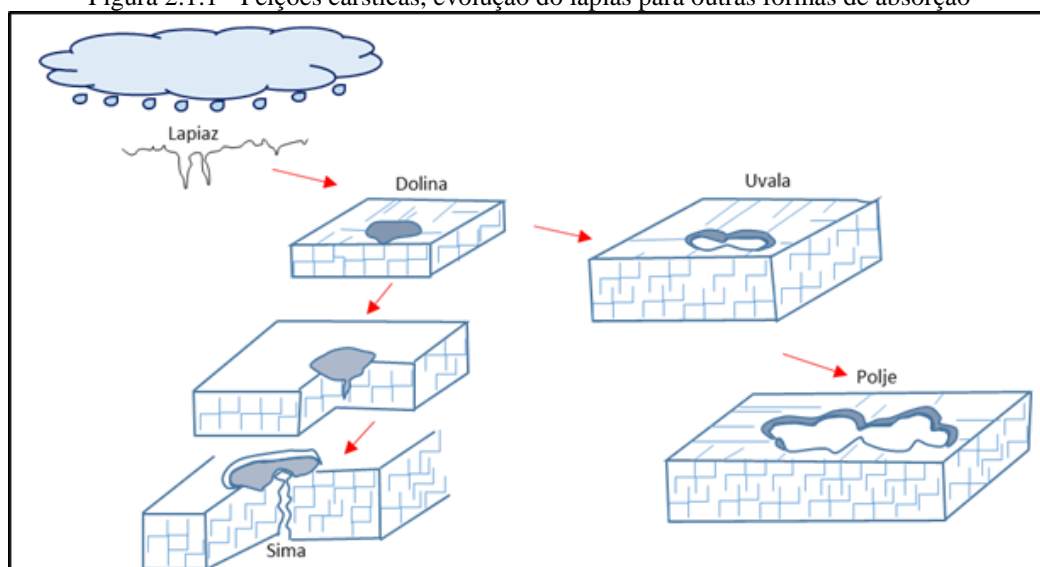
SISTEMA CÁRSTICO

A abordagem nesse capítulo é sobre os terrenos cársticos, a compartimentação do sistema cárstico e suas características, e o auxílio da geomorfologia na interpretação das paisagens cársticas e representantes hidrogeológicos nesse meio.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O termo carste é utilizado para terrenos que se distinguem pela existência de rochas solúveis (especialmente as carbonáticas), onde ocorre uma evolução particular de relevo ou feições cársticas como lapiás, dolinas, uvalas, poljes, sima, sumidouros e cavernas, (DIAS, 2009), as quais são consideradas por Freitas (2009) as principais formas de absorção epigênica (Figura 2.1.1). A evolução dessas feições se dá a partir da dissolução das rochas carbonáticas, diante da percolação da água, estando diretamente relacionada com a composição química e a porosidade da rocha, além de fatores físico-químicos e biológicos que comprometem o ambiente onde estas estão inseridas (DIAS, 2009).

Figura 2.1.1 - Feições cársticas, evolução do lapiáz para outras formas de absorção



Fonte: Modificado de Lladó (1970).

As feições cársticas ocorrem associadas a compartimentação do carste. Essa compartimentação se expressa não só em subsuperfície, revelando potenciais econômicos para águas, como superficialmente, demonstrando o quão essas regiões podem ser suscetíveis à

contaminação devido à natureza litológica atrelada à disponibilidade de percolação de água e desenvolvimento das feições cársticas.

As regiões cársticas, notadamente em terrenos carbonáticos, são consideradas como áreas de interesse econômico e hidrogeológico, pois, na maioria das vezes, dispõem de solos agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e apresentam importância ambiental, principalmente pelas feições geomorfológicas resultantes da dissolução da rocha carbonática, como dolinas e sumidouros. São, portanto, muitas vezes vulneráveis à contaminação antrópica, associada a fatores característicos deste tipo de ambiente como: baixa espessura dos solos, concentração de fraturas e carstificação nas camadas superiores do aquífero, além da ocorrência de pontos de recarga em cavidades e condutos formados pelo processo de carstificação (GOLDSCHIEDER, 2002).

Para Ford e Williams (1989), as regiões calcárias são áreas com feições geomorfológicas e hidrologia com características peculiares, que estão diretamente associadas ao importante papel da elevada solubilidade das rochas adjuntas a uma porosidade bem desenvolvida.

E para Bigarella (1996), o cenário cárstico é caracterizado, principalmente, devido à presença de uma drenagem de sentido predominantemente vertical e subterrânea, a qual segue as fendas, condutos e cavernas, tendo como consequência, muitas vezes, a inexistência de cursos de águas superficiais. Apresenta, portanto, aparências ruiformes e esburacadas, preponderantemente desenvolvidos em formações calcárias (calcários e dolomitos).

Ressalta ainda que a gênese do carste está ligada à vários fatores, destacando-se a litologia, estratigrafia, tectônica, paleoclima e o recobrimento florístico, os quais, associados, vão atuar no processo de espeleogênese. Conjuntamente, estes fatores auxiliam na maior ou menor característica das formas cársticas numa determinada região, permitindo ainda que os cenários cársticos apresentem feições topográficas específicas do processo de carstificação.

Os terrenos cársticos, por suas características inerentes, acabam por serem áreas de maior susceptibilidade à ação antrópica, em decorrência da ocupação das áreas urbanas, atividades agrícolas, captação de água subterrânea e mineração relacionada ao uso da rocha carbonática. Essas atividades, modo geral, são realizadas desordenadamente, sem critérios técnicos, de forma predatória e sem planejamento, acarretando processos que evoluem para acidentes geológicos associados a subsidências, colapso de solo e/ou rocha, degradando áreas de valor espeleológico, contaminando e podendo até poluir os aquíferos cársticos, os quais contem e valiosas reservas de água.

Muito embora para Kohler (1995) a gênese e evolução de uma paisagem cárstica

dependam do grau de dissolução da rocha, da quantidade e volume de água associados às características ambientais da litosfera, biosfera e atmosfera, pode-se inferir que a ação antrópica se caracteriza como um agente acelerador da evolução das feições geomorfológicas, aliadas às modificações dos cenários. Segundo Christofolleti (2001), o conhecimento da geomorfologia está totalmente inserido no diagnóstico das condições ambientais, fornecendo orientações à melhor instalação e ao assentamento das atividades humanas.

O conhecimento geomorfológico e geológico, bem como da hidrogeologia, em terrenos cársticos restringe-se, modo geral, aos pesquisadores e estudiosos, em se tratando do direcionamento à gestão pública. Sendo portanto, frequentemente, desconsideradas as características físicas desse ambiente, especialmente, no uso e ocupação dos espaços que lhe competem. Tornando-se muitas vezes potenciais locais de riscos geotécnico, modificando esses cenários cársticos (VESTENA, KOBİYAMA & SANTOS, 2002).

2.2 COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO CARSTE

A compartimentação geomorfológica do carste é atribuída por Piló (2000), além de Ford e Williams (1989) e Jones *et al.* (2003), na divisão em três domínios: exocarste, epicarste e endocarste.

O domínio mais exposto superficialmente, exocarste, representa um agrupamento morfológico que pode adquirir diversos tipos de feições cársticas diante de variáveis que ajustam o relevo (GUARESCHI, 2012).

As feições cársticas, segundo Boegli (1980), são distinguidas no relevo cárstico a partir do exocarste e do endocarste, consideradas por este como formas superficiais e subterrâneas. Ressalta ainda que o exocarste, modo geral, é o resultado do desenvolvimento do exocarste. As feições cársticas, características na zona do exocarste, são as formas negativas (poljes, uvalas e dolinas) e as positivas (maciços, torres e verrugas). Já na zona do endocarste são os condutos ou cavernas que podem ser representados por espeleotemas, tais como colunas, cortinas, estalactites, estalagmites etc.

As feições negativas são as de abatimento originadas das atividades hídricas (percolação vertical e horizontal de água de chuva) na subsuperfície, representadas, por exemplo, por dolinas (Figura 2.2.1), uvalas e poljes. E as feições positivas são as feições residuais que se apresentam acentuadas no relevo como maciços, mogotes e as torres (Figura 2.2.2) (BOEGLI, 1980 e PILÓ, 2000).

Figura 2.2.1 - Feição exocarste negativa - dolina
8575670 mN/0269232 mE, 24L



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.2.2 - Feição exocarste positiva, maciço
8526446 mN/0285553 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

O epicarste é caracterizado pela zona de contato da rocha com o solo (FORD & WILLIAMS, 1989; JONES *et al.*, 2003) ou zona subcutânea, onde a parte superior às rochas subjacentes, contendo material inconsolidado ou não, apresenta uma trama de fissuras originada por processos cársticos (PILÓ, 2000). Para Uagoda (2006), o material de alteração encontrado no local, possivelmente, é o resultado de alteração da própria rocha matriz ou uma superposição

de material da vertentes e fundo de vales em superfícies cársticas com grandes dimensões.

Assim, devem ser analisados nessa área do carste, não só o manto de alteração bem como o solo, caracterizados como elemento de destaque na zona epicárstica por estarem diretamente em contato com a rocha solúvel imediatamente abaixo, interagindo na circulação hídrica no interior do carste, e na preparação da morfologia da rocha abrigada, além do exocarste e endocarste (PILÓ, 2000).

O endocarste representa a zona subterrânea. Piló (2000) e Boegli (1980) demarcam a zona do endocarste como a representada por condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos: o carste subterrâneo.

As reações de dissolução da rocha carbonáticas, especialmente do mineral calcita. Em função da cinética química do sistema $H_2O-CO_2-CaCO_3$, onde soluções próximas do equilíbrio podem percolar a rocha por longas distâncias não alcançando a saturação absoluta do carbonato.

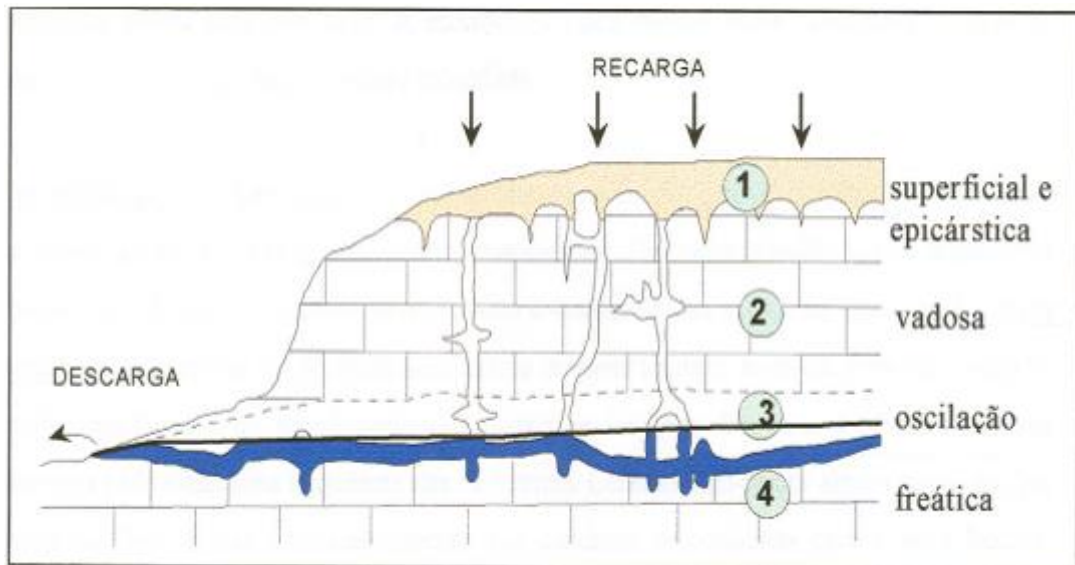
Há décadas, debates vêm à tona sobre o regime hidrológico mais adequado na origem de cavernas, além da essência de um nível base no carste. Para alguns estudiosos, além de Bretz (1942), Ford (1971), White (1988), Ford e Williams (1989) e Palmer (2011), sabe-se que as cavernas se formam não só na zona vadosa como na freática (nível freático).

Ressalta-se ainda a admissão de um nível piezométrico no carste, muito embora quando considerado o modelo hidrogeológico dos aquíferos em condutos e fissuras, o mesmo mostra-se heterogêneo. Segundo a hipótese vadosa, a questão fundamental é que as cavernas têm sua gênese a partir da ação de fluxos de águas subterrâneas por sobre o nível freático, por ação gravitacional, apresentada na zona hidrológica do carste (Figura 2.2.3).

De acordo com Ford e Williams (1989), a gênese de uma caverna (Figuras 2.2.4 e 2.2.5) se condiciona principalmente considerando as geometrias planares e lineares, além das interconexões existentes no arranjo estrutural das rochas, e sua relação geográfica com a área de recarga e de descarga hídrica.

Assim, as feições cársticas assumem diversas formas e funções a depender do compartimento cárstico em que se encontrem, e qual estágio de evolução do mesmo, que nada mais é que o resultado da modelagem realizada pela percolação da água sobre a rocha carbonática.

Figura 2.2.3 - Zonas hidrológicas do carste



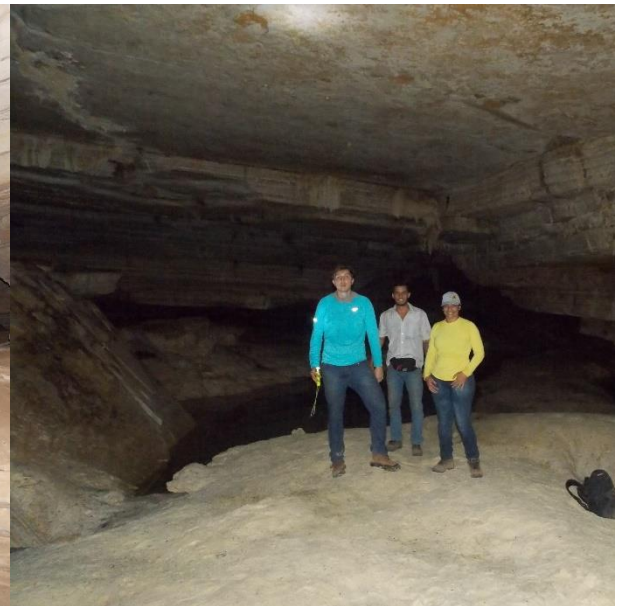
Fonte: Adaptado de Piló (2000).

Figura 2.2.4 - Feição do endocarste. Caverna Lapa do Bode
8569304 mN/0276052 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.2.5 - Feição do endocarste. Caverna na fazenda Natal.
8575670 mN/0269232 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

2.3 GEOMORFOLOGIA E O MEIO CARSTE

O diagnóstico do relevo é fundamental para avaliar a fragilidade ou vulnerabilidade do meio ambiente, com vistas no estabelecimento legal de sua proteção e ocupação. Dessa forma, o relevo, a partir de suas características, permite uma ocupação humana favorável e/ou desfavorável em certas regiões.

De acordo com Ross (1990), o mapeamento geomorfológico constitui, fundamentalmente, os métodos para a pesquisa e conhecimento da geomorfologia, auxiliando no planejamento ambiental, avaliando informações a respeito de potencialidades, vulnerabilidades, restrições e riscos de ocupações e intervenções possíveis na paisagem.

O mapeamento geomorfológico fornece bons subsídios para o entendimento da dinâmica de recarga e descarga do meio aquífero no carste, por exemplo, a partir da compartimentação geomorfológica de suas feições. Assim, áreas de recarga e descarga do aquífero tendem a se manifestar por um conjunto específico de feições no relevo, consideradas por Guareschi (2012) como as áreas de recarga/captação as feições negativas (depressões fechadas) e áreas de descarga representadas pelas nascentes e ressurgências. Essas feições também podem evoluir em subsuperfície e de forma subterrânea, compartimentando a geomorfologia do meio carste.

Os conjuntos de feições, quando observados e direcionados para o mapeamento, devem ser validados a partir da interpretação e geração de dados geomorfológicos, bem como o auxílio de ferramentas de geoprocessamento.

Esse entendimento colabora para o desenvolvimento de prognósticos e interpretações das condições ambientais (ROSS, 1990 e 2006). Desta forma, os estudos geomorfológicos são melhores consubstanciados pela representação cartográfica dos fatos geomorfológicos, ou seja, é mais bem apreendido e abstraído pela espacialização das formas de relevo e suas relações com estrutura e processos, bem como com a própria dinâmica desses, considerando suas particularidades (CASSETI, 2006), que estão diretamente ligadas ao substrato rochoso, e ao meio ambiente.

Compreender a forma da superfície, os processos que atuam em sua escultura e o conhecimento de sua evolução, estão diretamente atrelados à geomorfologia (FORD & WILLIAMS, 2007).

No que tange a modelagem/paisagem dos terrenos cársticos, para Lladó (1970) e Silva (2005), existem características exclusivas em cada região, principalmente diante das mudanças climáticas. Sendo a precipitação, dentre os fatores climáticos, o que indica o volume de água que pode interferir na ação do entalhe do carste, podendo influenciar na maior ou menor modelagem dos fenômenos cársticos, diante da intensidade de chuvas nas diversas regiões.

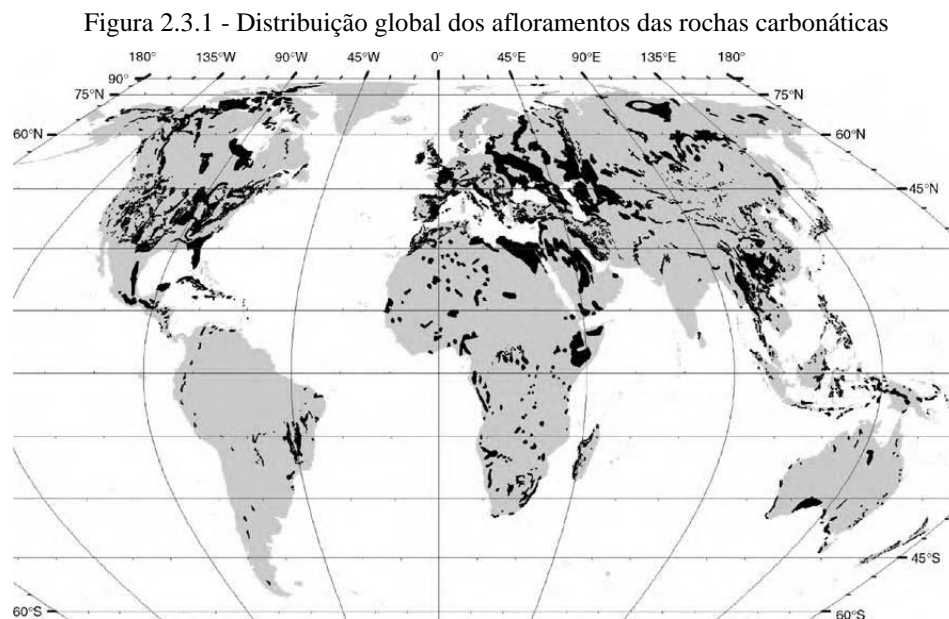
Obviamente, para Dias (2009), distintas condições de limite desempenham expressiva interferência no desenvolvimento do relevo, a saber: clima, a composição e espessura do pacote carbonático, a presença de níveis solúveis e insolúveis, além do sistema

provocado pelo tectonismo. São estes os mais importantes fatores que interferem no desenvolvimento do relevo cárstico.

Em locais de baixa precipitação pluvial bem como circulação hídrica, modo geral os fenômenos cársticos não acontecem (LLADÓ, 1970; SILVA, 2005).

As regiões cársticas exibem seu modelado em torno de 20% da área continental mundial livre de terrenos glaciais (Figura 2.3.1). São expostas a partir do conjunto de vários processos geomorfológicos como erosão eólica, costeira, fluvial, glacial, física e química etc. Somam-se ainda cerca de 20 a 25% da população mundial que depende, em boa parte ou inteiramente, das águas subterrâneas obtidas a partir dos aquíferos formados nesse meio (FORD & WILLIAMS, 2007).

Em se tratando da Bahia, as extensas regiões cársticas são representadas pelas bacias intracratônicas neoproterozoicas de Irecê, Salitre, Una-Utinga e Oeste, caracterizadas, sobretudo, pelos Grupos Una e Bambuí.



Mapa montado usando SIG na projeção de área igual Eckert IV a partir de mapas regionais, muitos dos quais foram posteriormente publicados em Gunn (2004).

Fonte: Ford e Williams (2007).

2.4 HIDROLOGIA CÁRSTICA E PROCESSO DE CARSTIFICAÇÃO

O processo de percolação das águas em ambientes cársticos, associado à porosidade das rochas, podem permitir o acúmulo de água, ocorrendo muitas vezes grandes reservatórios

subterrâneas. Portanto, os aquíferos cársticos podem ser considerados potenciais abastecedores de água em muitas cidades.

Karmann (2016), ressalta que a característica que diferencia o sistema cárstico dos demais sistemas aquíferos é a modificação de parte do sistema fraturado, em que ocorrem os condutos, resultante da evolução de permeabilidade terciária. Ocorrendo, portanto, a interferência mútua dos fatores hidrológicos, químicos e geológicos e conseqüente aumento da porosidade terciária. Ocorre, acontece a espeleogênese, que permite a instalação de cavernas, as quais constituem acessos através da rede de drenagem subterrânea do aquífero, para o ser humano. A conseqüente porosidade elevada no sistema de condutos nos aquíferos cársticos faz deles altamente produtivos, considerados importantes para o recurso hídrico subterrâneo.

Silva (2002), observa que estes aquíferos são os resultados do conjunto de transformações que ocorrem em uma região de rochas carbonáticas em conseqüência da circulação da água neste meio, favorecido também por contribuições pluviométricas. Tais transformações são as principais características que distingue os demais aquíferos, dos cársticos, sendo em realidade o resultado da procura natural do equilíbrio químico entre a água e as rochas carbonáticas. Para Frantz (2005), estes aquíferos, são considerados vulneráveis ambientalmente devido à alta velocidade de circulação da água subterrânea pelas fraturas e condutos e a baixa interação contaminante-rocha, o que provoca uma elevada capacidade de propagação de contaminantes no aquífero.

O fato das rochas carbonáticas sofrerem o processo de dissolução é devido ao acesso da água por meio destas, e está inteiramente relacionado com a composição química e a porosidade das mesmas, ademais é afetada por fatores físico-químicos e biológicos do ambiente em que as rochas carbonáticas ocorrem (DIAS, 2009).

Estas características são o resultado do processo de carstificação, atrelado diretamente à geologia, o qual promove as feições geomorfológicas, diante da percolação de água através das fissuras e condutos. O modo localizado de percolação das águas deve-se à variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, que é muito maior nos meios cársticos que em outros meios permeáveis (SILVA, 2002).

Para Dias (2009), o processo de carstificação inicia no momento que, em algum lugar do terreno, a rocha calcária tem sua exposição à superfície, e a água penetra os espaços vazios existentes na rocha, chegando a atingir espaços na ordem de 10 μ . Destaca ainda que as rochas carbonáticas são dissolvidas por águas que contem CO_2 , o que não ocorre com as rochas insolúveis. E devido a uma progressiva ampliação das frestas primárias, ocorre acréscimo da água transportada através da rocha carbonática, aumentando diretamente a quantidade de

carbonato retirado por dissolução.

Ainda para o mesmo autor, essa ação resulta num complexo aquífero em rocha carbonática, um complicado sistema tridimensional de condutos de dissolução que alimentam e drenam o aquífero. Ficando por muitas vezes boas quantidades de água armazenadas nas fissuras e espaços vazios. A evolução efetiva desses condutos de drenagem origina os sumidouros na superfície, os quais conduzem águas superficiais para o aquífero.

O processo de erosão da camada impermeável progride até que a rocha carbonática surge à superfície, expondo-se ao contato direto com a água superficial e meteórica que por lixiviação, circula no aquífero promovendo novos caminhos para o fluxo subterrâneo.

Assim, o caminho da água subterrânea é favorecido especialmente pela presença das feições cársticas, que são responsáveis pela recarga/captação e descarga dessas águas, e desenvolvem-se de acordo com o suprimento e permanência de água circulante no meio, além da localização dessas em cada zona de compartimentação no carste.

2.5 REPRESENTANTES DA HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

O aquífero cárstico, para Freitas (2009), caracteriza-se por uma trama essencial de condutos conectados a feições de recarga /captação e de descarga do aquífero, as feições de captação respondem pela percolação rápida para o endocarste. As feições de descarga permitem a exsudação da água subterrânea trazida de volta à superfície, através de ressurgências, nascentes e fontes de forma naturais.

Avaliar o desempenho do aquífero cárstico e conjecturar direções preferenciais de condutos conectados às feições superficiais, sendo de fundamental importância para a traçar o caminho das principais passagens da água, bem como identificar as feições cársticas que colaboram para captação e descarga inadequada de poluentes, que possam afetar especialmente o consumo humano (FREITAS, 2009).

Os aspectos geomorfológicos e geológicos do território nacional sempre chamaram a atenção dos estudiosos, especialmente em relação às feições cársticas desenvolvidas sobre rochas carbonáticas ou não.

Estas feições surgem associadas aos processos de intemperismo químico, físico-químico, além dos biológicos, os quais atuam sobre unidades morfoestruturais, compostas por rochas metamórficas, sedimentares e ígneas, resultando numa diversidade de feições (PILÓ, 2000). Sendo as principais interligações da superfície com o aquífero cárstico.

2.5.1 Feição de recarga de água subterrânea

Essas feições são as que captam as águas superficiais que são direcionadas e abastecem o aquífero, caracterizadas pelas feições/formas negativas e representadas, por depressões fechadas denominadas, dolinas ou uvalas e poljes.

As dolinas (Figura 2.5.1) e uvalas são representantes menores que os poljes. As primeiras, modo geral, exibem a feição circular ou elíptica, mais largas que profundas e são consideradas as feições mais representativas da paisagem cárstica.

As uvalas originam-se a partir da coalescência de duas ou mais dolinas, exibem o formato de uma flor com fundo irregular, podem ocorrer um ou mais sumidouros (Figura 2.5.2) (DIAS, 2009). Esses são a extremidade superficial do conduto subterrâneo que captura a água para o aquífero, é uma feição de menor porte e de acordo com Guerra e Cunha (1994), estas feições podem ocorrer dentro de feições maiores.

Os poljes são os maiores representantes das depressões fechadas, podem atingir centenas de quilômetros de extensão exibindo fundo plano, são grandes planícies de desgaste.

As depressões fechadas, segundo Dias (2009), são condicionadas pela drenagem, zona carstificada, e pela cobertura de solo ou outras camadas, que pode existir ou não.

Podem desenvolver-se por colapso ou subsidência de solo ou material inconsolidado e de material rochoso, ocorrendo, então, um brusco transporte vertical do material acima, através de espaços abertos por dissolução, desenvolvendo de modo rápido uma dolina.

Assim, quando esse fenômeno de subsidência acontece em áreas urbanizadas podem ocorrer desastres e perdas irreparáveis, tanto materiais, quanto humanas.

Figura 2.5.1 - Feição de captação de água subterrânea – Dolina
8575670 mN/0269232 mE/24L



Fonte: Autoria própria.

Figura 2.5.2 - Feição de captação de água subterrânea – Dolina
854428 mN/0280747 mE/24L

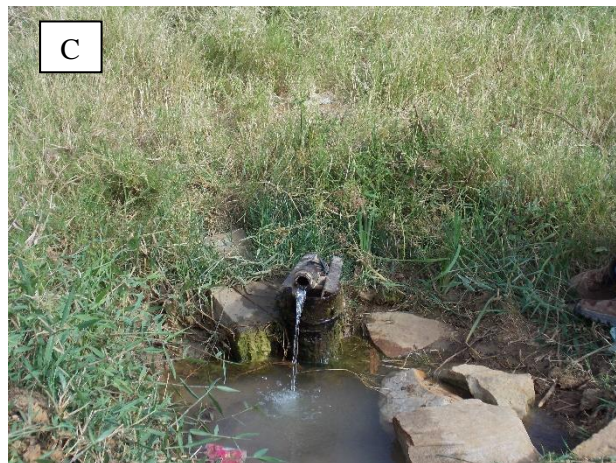
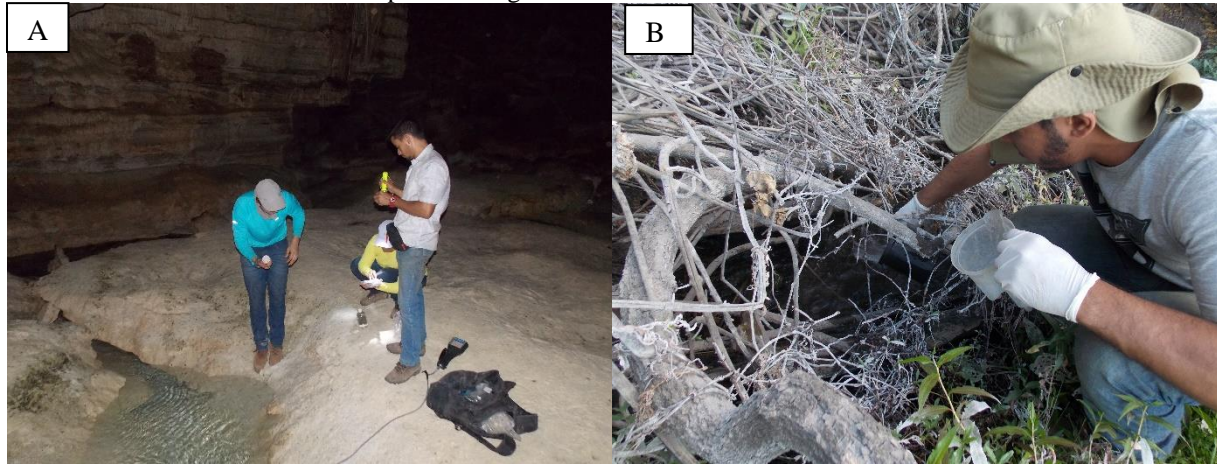


Fonte: Autoria própria.

2.5.2 Feição de descarga de água subterrânea

Essas feições são feições consideradas drenantes ou de descargas, são feições naturais, como nascentes, surgências ou ressurgências (Figura 2.5.3), as quais conduzem as águas subterrâneas de volta à superfície. Essas feições, modo geral, se desenvolvem próximas aos contatos com rochas impermeáveis ou menos solúveis.

Figura 2.5.3 - Feições naturais - nascentes, surgências ou ressurgências.
(A) Faz. Natal, município de Itaetê 8575670 mN/0269232 mE 24L, (B) nascente próximo a faz. Moreno município Nova Redenção, 8583069 mN/0266298 mE/24L (C) Poço Mocambo surgente/jorrante, no município de Utinga 8664848 mN/0276276 mE/24L.



Fonte: Autoria própria.

CAPÍTULO 3

VULNERABILIDADE DO CARSTE

Nesse capítulo a vulnerabilidade do carste será abordada visando a questão intrínseca destes aquíferos, além de exemplos das aplicações já feitas dos métodos selecionados.

3.1 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

A introdução do conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, por Margat (1968) e Albinet e Margat (1970), permitiu um despertar evolutivo de interesse em relação à proteção das águas subterrâneas, por parte da comunidade científica (VÍAS *et al.*, 2006). Assim, os mapas de proteção das águas subterrâneas, que começaram a ser preparados nos meados do século XX, foram o objeto de origem para que a vulnerabilidade à contaminação entrasse no contexto dos estudos à contaminação dos aquíferos. Segundo Vrba e Zaporozec (1994), a partir de então, ocorreu um momento de evolução de diversas metodologias para aferir a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação.

Nos anos 80 e 90, muitas metodologias foram desenvolvidas, a exemplo da DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), nos Estados Unidos da América, e GOD (FOSTER, 1987; FOSTER & HIRATA, 1988), no Reino Unido, ocorrendo a evolução de normatizações e metodologias para o incremento do procedimento SINTACS (CIVITA, 1994). Cabe ainda destacar contribuições a respeito de diagnósticos de vulnerabilidade, em especial para aquíferos cársticos, derivando em métodos EPIK (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1997), PI (GOLDSCHIEDER, 2002) e COP (VIAS *et al.*, 2002, 2006).

O conceito de vulnerabilidade, apresentado por Hirata (2001), tem sido usado para expressar propriedades inerentes que determinam a suscetibilidade de um aquífero ser desfavoravelmente atingido por uma carga poluente antrópica imposta. Neste contexto, o termo “vulnerabilidade natural de um aquífero” pode ser acentuado como o fator primordial para a estimativa da sensibilidade do aquífero poder ser contaminado (RUSSO, 2009). Para esse autor, a avaliação da água subterrânea está atrelada a diversos fatores ambientais, associados à geologia, geomorfologia, espessura da camada não saturada, recarga natural, escoamento superficial e exploração da água, relacionados às características naturais intrínsecas ao reservatório, que determinam a condição deste ser afetado por uma carga contaminante.

Conceito intimamente associado à vulnerabilidade foi definido por Foster e Hirata

(1988), que ressaltaram o perigo à contaminação das águas subterrâneas diante da inter-relação entre a vulnerabilidade dessas águas e uma carga contaminante potencial associada a uma atividade já instalada.

Assim, o tipo de aquífero é especialmente preponderante para a avaliação da vulnerabilidade. Sendo que, para Duarte *et al.* (2013), os aquíferos cársticos são os mais sensíveis à ação e expansão de poluentes, corroborando com Negrão (1987), que adverte essa suscetibilidade diante das características específicas deste sistema, que são o resultado da ação solubilizadora das águas nas rochas carbonáticas. Hirata e Fernandes (2005) definem a vulnerabilidade como a susceptibilidade intrínseca do sistema de águas subterrâneas, o qual é adversamente afetado por uma carga contaminante de natureza antrópica.

As bases para o desenvolvimento da cartografia de vulnerabilidade intrínseca foram discutidas, inicialmente, por Vrba e Zaporozec (1994) e em seguida por Zwahlen *et al.* (2003), por meio da separação de áreas em classes, em relação à capacidade que o meio superficial tem em resguardar as águas subterrâneas. Indicaram, então, uma diferença entre os conceitos de vulnerabilidade intrínseca e específica, a saber:

✓ Vulnerabilidade intrínseca considera a susceptibilidade da água subterrânea, levando em conta as características geológicas e hidrogeológicas, independente da natureza do(s) contaminante(s), além dos condicionantes climáticos de uma área.

✓ Vulnerabilidade específica considera a susceptibilidade da água subterrânea, a um contaminante ou grupo de contaminantes, levando em consideração as propriedades e relações da vulnerabilidade intrínseca.

Para De Jesus (2018), é importante ressaltar que o *National Research Council* – NRC dos Estados Unidos da América, (NRC, 1993) considera que o conceito de vulnerabilidade, usado de forma genérica, leva em conta o impacto em águas subterrâneas ocasionados por atividades humanas e contaminantes provenientes, em algum momento, da superfície do terreno. As contaminações propositais e pontuais, a exemplos de vazamentos de tanques de combustíveis ou contaminação por chorume, não são incluídas, além de recargas artificiais de injeção em poços. As contaminações naturais, a exemplo das cunhas salinas ou elementos traços geogênicos também não são englobados pelas definições de vulnerabilidade.

Vrba e Civita (1994) constituíram dois amplos grupos de propriedades levando em consideração importâncias primárias e secundárias. Desses grupos foram definidas as variáveis que interferem na vulnerabilidade das águas subterrâneas, que devem ser avaliadas considerando a área de estudo, assim, com importância primária, as áreas de recarga, solo e a zona não saturada, e secundariamente, a topografia, substrato do aquífero e contato com águas

da superfície ou marinha. Essas variáveis são definidas a seguir:

✓ Recarga: tem sua importância por estar atrelada aos transportes de contaminantes da superfície até o interior do aquífero, bem como aos processos físicos e químicos que agem na relação solo-rocha-água com diferentes magnitudes;

✓ Solo: é considerado importante no que diz respeito a competência de proteção das águas subterrâneas diante da contaminação. Modo geral pode abrandar os processos físicos, químicos e biológicos, bem como o impacto dos potenciais contaminantes, que são considerados a partir da textura, estrutura e presença de matéria orgânica para essa variável;

✓ Zona não saturada: variável importante para aferir a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas, especialmente em locais com solos rasos ou inexistentes, onde essa variável passa a fazer o papel da principal de proteção do aquífero. É importante considerar os seguintes parâmetros: litologia, permeabilidade e espessura da camada, bem como o nível de confinamento no qual está o aquífero;

✓ Zona Saturada: variável também importante para aferir a vulnerabilidade e para tanto deve considerar os seguintes parâmetros: porosidade, condutividade hidráulica, transmissividade e direção do fluxo.

Nossa (2011) ressalta que o “emprego da cartografia de vulnerabilidade para gestão de risco e planejamento do território é um instrumento útil e eficaz para a prevenção do processo de contaminação”. O uso desse instrumento designadamente à cada tipo de contaminante é uma empreitada que requer um alto custo econômico e temporal, especialmente devido às várias substâncias que podem afetar as águas subterrâneas e devem ser estudadas individualmente.

Todas essas variáveis supramencionadas devem ser avaliadas conjuntamente para que a carta ou mapa de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos possa ser efetuado com a devida acuidade, e as mesmas devem considerar as particularidades de cada aquífero. Essas variáveis devem ser ponderadas considerando a metodologia a ser aplicada na área de estudo.

Entretanto, para Santos, Cruz e Nascimento (2010), é de fundamental importância advertir que a estimativa da vulnerabilidade dos aquíferos e a criação da cartografia para determinar as áreas susceptíveis do aquífero à ação dos contaminantes é algo que abarca uma quantidade grande de variáveis e de dados, podendo gerar limitações e prováveis erros de interpretação. Sendo possível formular os seguintes princípios básicos aos estudos da vulnerabilidade de aquíferos: os aquíferos são todos vulneráveis em algum grau; a incerteza é inerente a todas as cartografias de vulnerabilidade; o risco que o óbvio possa ser obscurecido e o sutil indistinguível existe sempre.

3.2 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS CÁRSTICOS

Os recursos hídricos subterrâneos vêm sofrendo interferências antrópicas por meio de atividades, que são potencialmente contaminantes, realizadas em superfície e subsuperfície, necessitando estudos de sua espacialização em relação ao uso e ocupação dos solos e da vulnerabilidade desses recursos frente à contaminação (VOGEL, 2008).

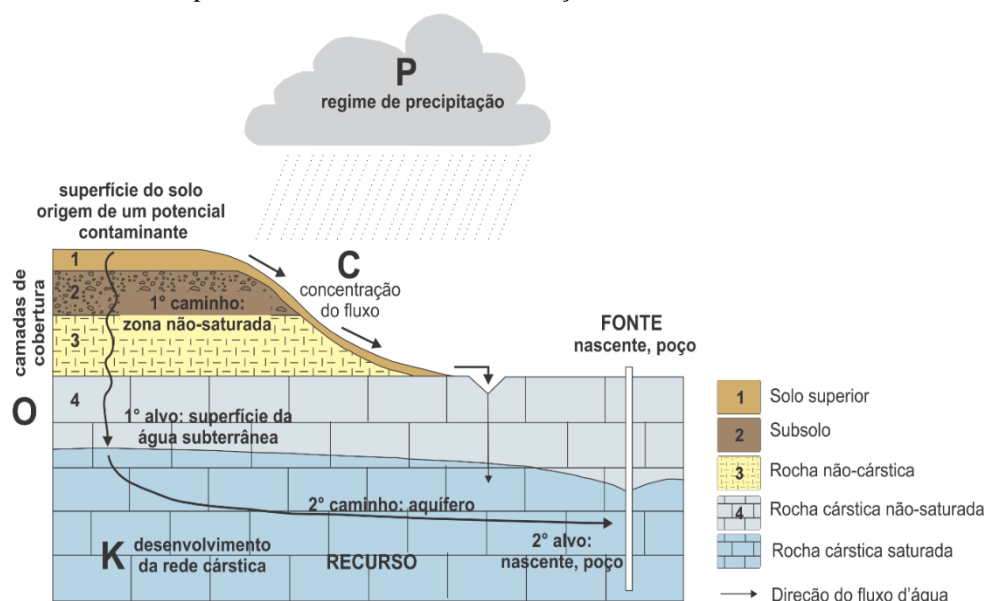
Em se tratando dos aquíferos cársticos, estes apresentam várias particularidades que os diferenciam dos granulares, não sendo, portanto, consideradas por uma grande parte dos métodos convencionais de determinação da vulnerabilidade (ANDREO, 2004). Ainda para o mesmo autor, a capacidade de abrandamento de contaminantes, em aquíferos granulares e fissurais, pode ser alta devido à presença de solo e sedimentos areno-argilosos na zona não saturada, o que nem sempre ocorre em aquíferos cársticos, por não existir, algumas vezes, essas camadas de proteção.

Conforme Zwahlen *et al.* (2003), a natureza dos aquíferos cársticos é favorável à contaminação. Seu substrato rochoso, por sua composição, é mais facilmente solubilizado, modo geral, recoberto por solos de pouca profundidade, e feições cársticas que servem como pontos de recarga do aquífero, por exemplo dolinas. Muito embora cada sistema cárstico seja único e de difícil previsão em termos de porosidade, permeabilidade e solubilidade de suas rochas, não tendo, portanto, um padrão minimamente definido, como a maioria dos outros aquíferos. Considera-se, portanto, os aquíferos cársticos naturalmente susceptíveis à contaminação.

Por suas características especiais, foram desenvolvidos métodos para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação em aquíferos cársticos, por exemplo EPIK (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1997), PI (GOLDSCHIEDER, 2002) e COP (VÍAS *et al.*, 2002; 2006).

O enfoque europeu (ZWAHLEN *et al.*, 2003) ampliou um sistema conceitual de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos cársticos considerando fatores que serão apresentados seguidamente e podem ser observados na Figura 3.2.1. O esquema da figura foi adaptado para aquíferos cárstico e evidencia o modelo “origem-caminho-alvo” (*origin-pathway-target model*), em que a origem é relacionada com a área onde a contaminação é lançada, no caso a superfície; o caminho caracteriza trajeto, que pode ser vertical ou superficial, do fluxo realizado pelo contaminante desde a superfície até dentro do aquífero; e o alvo é a água, tanto no aquífero, quanto nas nascentes e poços.

Figura 3.2.1 - Modelo “origem-caminho-alvo adaptado para o aquífero carste, apresentando os principais parâmetros evidenciados na avaliação de vulnerabilidade



Fonte: Adaptado de Zwahlen *et al.* (2003) apud De Jesus (2018).

Desta forma, para se investigar um aquífero cárstico quanto a sua vulnerabilidade, e corroborando com o autor supramencionado, Daly *et al.* (2002) e Zwahlen (2004), apresentam os parâmetros que condicionam essa averiguação (destacados na figura), que são: a concentração do fluxo (C), camada de proteção (O), precipitação (P) e processo de carstificação (K), os quais são atribuídos as metodologias aplicáveis aos aquíferos cársticos considerando cada área especificamente, e também foram descritos por Vías *et al.* (2004; 2006), a saber:

✓ Concentração do fluxo (C) se relaciona ao nível de proteção natural da zona não saturada, a qual se modifica diante de condições de superfície que invalidam sua capacidade de filtração; a exemplo de locais como sumidouros, onde a água atinge uma infiltração rápida. Assim, a água associada a contaminantes alcança o nível piezométrico não havendo nenhum abrandamento da contaminação. Esse fator é importante e está diretamente atrelado as feições cársticas superficiais, diante a possibilidade da rápida infiltração onde as mesmas tendem a se desenvolver;

✓ Camada de proteção (O) se refere à proteção natural do aquífero à contaminação. A estimativa desse atributo leva em consideração as propriedades do solo e da zona não saturada;

✓ Precipitação (P), fator diretamente atrelado ao transporte de contaminantes para dentro do aquífero, além de interferir na diluição e atenuação de contaminantes, não tem relação com as características intrínsecas do aquífero, por ser um agente externo. É importante e validado diante de sua quantidade e intensidade de ocorrência;

✓ Processo de carstificação (K) se refere diretamente as particularidades da zona saturada, sendo que a evolução da carstificação do aquífero é fator preponderante e condicionante ao comportamento hidrogeológico, associado a parâmetros como: tempo de circulação de um contaminante potencial, concentração máxima desse contaminante e a permanência de um potencial episódio de contaminação.

A combinação desses fatores permite a realização dos mapas de vulnerabilidade, efetivados não somente para aquíferos cársticos como para suas nascentes e poços. No caso dos aquíferos cársticos, os parâmetros empregados são O, P e C, e em se tratando das nascentes e poços são imprescindíveis os fatores O, C, P, e K. Os resultados cartográficos para as duas análises geram a determinação de zonas de proteção e, em combinação com mapa de risco, podem também ser utilizados para a avaliação de risco ambiental (DE JESUS, 2018).

Com base no modelo “origem-caminho-alvo”, ou com muitas semelhanças a este, surgiram métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, e mais recentemente, os adaptados aos aquíferos cársticos. Desde o início dos estudos de vulnerabilidade couberam contribuições realizadas sobre diagnóstico da vulnerabilidade, resultando na evolução de algumas metodologias (NOSSA, 2011). A Tabela 3.2.1 resume os parâmetros considerados nos métodos PI (GOLDSCHIEDER, 2002) e COP (VÍAS *et al.*, 2002; 2006), que serão aplicados na BUU, especialmente por já existirem trabalhos realizados no aquífero Salitre.

Tabela 3.2.1 - Métodos e parâmetros correspondentes na utilização da estimativa de vulnerabilidade de aquíferos cársticos

Parâmetro utilizado	PI	COP
Declividade do terreno	*	*
Redes de drenagens	*	*
Características dos solos	*	*
Características da zona não-saturada	*	
Profundidade até a água	*	
Feições hidrogeológicas	*	*
Recarga	*	*

Fonte: Adaptado de Polemio, Casarano e Limoni (2009).

3.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS COP E PI

Diferentes métodos de avaliação são aplicados em estudos comparativos de vulnerabilidade intrínseca. O trabalho que originou o método COP, realizado por Vías *et al.* (2006) na Espanha, por exemplo, comparou os resultados de quatro métodos: GOD (FOSTER, 1987), AVI (VAN STEMPVOORT *et al.*, 1993), DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) e COP nos

aqüíferos cársticos Sierra de Libar e Torremolinos, com diferentes características hidrodinâmicas, graus de carstificação e condições climáticas. Entre os métodos aplicados, o COP demonstrou uma maior distinção nas classes de vulnerabilidade encontradas, analisando o fator litológico, a influência das feições cársticas no processo de infiltração, seja difusa ou concentrada e as condições de precipitação. Desta forma, o método COP foi mais eficaz para a determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aqüíferos considerados.

Segundo Zwahlen (2004), o método COP, tem sido estudado como prático e útil para ser aplicado por gestores municipais para a determinação da proteção das águas subterrâneas, podendo ser aplicado como técnica preventiva, quando se trata do uso solo e dos recursos hídricos de forma consciente.

O COP foi aplicado em países da África, Cuba, China, Alemanha, Eslovênia, França, Itália e Portugal, com obtenção de bons resultados, especialmente em áreas com baixa pluviosidade, como a região mediterrânea, onde o método foi desenvolvido. Segundo Andreo *et al.* (2006), a Espanha aplicou o método para determinar vulnerabilidade intrínseca à contaminação de todos os aqüíferos cársticos do país, objetivando unificar a avaliação de risco à contaminação em um método de proteção apropriada para os aqüíferos, especialmente ao usados para consumo humano.

Na Bahia, De Jesus (2018) aplicou os métodos COP e PI na bacia hidrográfica do rio Baixo Corrente no aqüífero Bambuí, caracterizado por ser um sistema cárstico-terrígeno. E constatou que os métodos aplicados na área compartilham parâmetros semelhantes, porém devido aos valores e relações atribuídas, geraram resultados bastante distintos.

Gasser, Cruz e Gonçalves (2018) aplicaram o método COP no aqüífero Salitre, no município de Cafarnaum, em que obteve como resultado 4 classes de vulnerabilidade para a área de estudo: 12,5% da área de classe muito alta, 0,7% alta, 28,0% moderada e 58,7% muito baixa.

Vilanueva *et al.* (2015), aplicaram os métodos COP e PI, com resultados aceitáveis na avaliação da vulnerabilidade do aqüífero Salitre, na região de Lapão e Irecê, onde, foi permitido estabelecer 3 classes de vulnerabilidade com valores percentuais para a área de estudo de: muito alta (7%), moderada (53%) e baixa (40%).

CAPÍTULO 4

HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

Esse capítulo aborda a hidrogeologia cárstica, hidroquímica associada às águas subterrâneas em meios cársticos no que tange aos elementos químicos associados, isótopos, bem como a classificação dessas águas, com vistas à potabilidade.

4.1 HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

A palavra hidrogeologia foi criada pelo francês Jean-Baptiste de Lamarck, em 1802, com o intuito de descrever o papel da água na morfologia da terra. Contudo, o conceito associado à geologia que estuda águas subterrâneas foi aplicado por Joseph Lucas em 1877. O termo durante um bom tempo ficou em desuso, sendo usadas as nomenclaturas: hidrologia de águas subterrâneas e hidrologia subterrânea (FEITOSA *et al.*, 2008).

Cada sistema cárstico é único e possui suas próprias características estruturais altamente heterogêneas. Os aquíferos cársticos possuem alta permeabilidade devido aos condutos, fraturas e planos de acamamento cercados por um grande volume de rochas de baixa permeabilidade (TRAVASSOS, 2010). Permitindo, muitas vezes, a existência de boas reservas de águas subterrâneas possíveis de abastecer as comunidades que vivem no entorno dessas áreas.

O aquífero cárstico Salitre, objeto dessa pesquisa, localizado nas bacias neoproterozoicas Irecê e Una-Utinga, foi abordado, quando se tratando da bacia de Irecê, em diversos aspectos através dos seguintes autores: Cunha (2018), Gasser (2017), Santos (2017), Salles (2017), Gonçalves (2017), Santos, Cruz e Nascimento (2010), Santos (2011), Nossa (2011) e Santos (2005).

4.2 HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Hidroquímica estuda a química das águas com o objetivo de quantificar as principais propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas e estabelecer uma relação com o meio físico. De acordo com Cerqueira (2014), a partir da litologia em que a água está armazenada, ela se comporta de maneiras diferentes. Em rochas porosas o deslocamento e a capacidade de armazenamento são maiores que em rochas cristalinas, considerando outros

fatores, que poderiam contribuir com a possibilidade de maior armazenamento com as porosidades secundárias como as fendas e fraturas interconectadas. Assim, o ramo da Hidrogeologia que trata da caracterização e migração das substâncias químicas presentes nas águas subterrâneas é a Hidroquímica.

Santos (2011), ressalta que a hidroquímica das águas subterrâneas no seu estado bruto, não havendo a influência de fatores antrópicos, está diretamente conexas às condições geológicas do aquífero, como litologia, fluxo subterrâneo, recarga, profundidade e o tempo de contato da água no sistema aquífero, bem como fatores climáticos da região. Ressalta ainda que atributos extremos possam comprometer a qualidade da água, a exemplo de áreas mineralizadas e, principalmente, ação antrópica.

É de fundamental importância a análise hidroquímica das águas subterrâneas, já que visa à compressão a respeito da qualidade das águas, levando em consideração a coleta de novos dados com vista à acurácia da sua modelagem conceitual e numérica, bem como a avaliação de riscos de contaminação e a aferição da efetividade das medidas de proteção de qualidade das águas subterrâneas (FOSTER & HIRATA, 1991; HIRATA & REBOUÇAS, 1999; ANDREO *et al.*, 2002; HIRATA & FERNANDES, 2006; VRBA, 2006; e MESTRINHO, 2008).

Na área de estudo, buscou-se realizar as análises físico-químicas, no intuito de definir as características hidroquímicas do aquífero cárstico Salitre na BUU, visando o conhecimento da qualidade das águas subterrâneas que são utilizadas para consumo humano, dessedentação de animais e irrigação das culturas de subsistência na região estudada.

Assim, as águas avaliadas devem ser comparadas com o disposto na Portaria Nº 2419 de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde, que “Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade” e em se tratando de água para o consumo humano, que considera todo o capítulo I em seus artigos e capítulo II, artigos I a III, V e VI.

Além da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28 de setembro de 2017 que dispõe sobre “Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, onde inseriu a Portaria 2419/11 no capítulo V da Vigilância Em Saúde, Seção I do Plano Diretor de Vigilância Sanitária, Art. 129, o Anexo XX dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

A avaliação das águas subterrâneas é objeto desse estudo, e sua principal característica hidroquímica é por estarem associadas aos calcários da formação Salitre. Portanto, as concentrações de cálcio e magnésio serão frequentes nos poços da área de estudo.

4.2.1 Elementos químicos que mais ocorrem em aquíferos cársticos

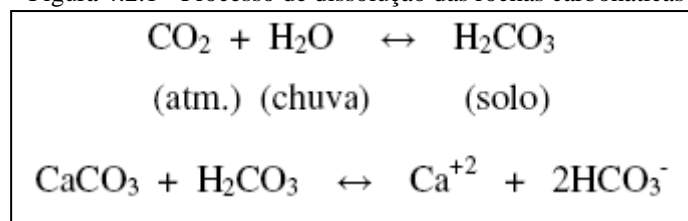
Nos aquíferos cársticos a dureza total é papel das concentrações dos íons principais desses aquíferos, o Ca^{++} e Mg^{++} , que se encontram em solução e modo geral é expressa em teor de CaCO_3 presente na água, sendo, portanto, frequente na área de estudo devido às características litológicas do aquífero cárstico Salitre, que ocorre na BUU. A dureza pode ser alta em ambientes cársticos, especialmente devido à dissolução de minerais como a calcita e a dolomita. De acordo com Briggs e Ficke (1977), o ferro, o alumínio e o manganês, em altas concentrações, são elementos que podem contribuir para o aumento do teor da dureza.

Os carbonatos e bicarbonatos são frequentes em aquíferos cársticos e estão atrelados aos processos de carstificação associados à dissolução das rochas carbonáticas integrantes desses aquíferos.

Para Krauskopf (1972), ocorre uma interação entre o ácido carbônico e os minerais carbonatados, a qual determina as condições em que as rochas carbonáticas se desenvolvem ou são submetidas a processos de dissolução, a partir da reação na Figura 4.2.1.

Em estudo realizado por Nossa (2011) no aquífero Salitre em Irecê, foi constatado que a dissolução dos calcários ocorre a partir da produção de CO_2 na atmosfera que propicia o início desse processo. No entanto, para Negrão (1987), as reações bioquímicas decorrentes da decomposição da matéria orgânica no solo e a formação de ácidos húmicos liberam CO_2 em quantidades bem mais significativas do que a atmosfera.

Figura 4.2.1 - Processo de dissolução das rochas carbonáticas



Fonte: Nossa (2011).

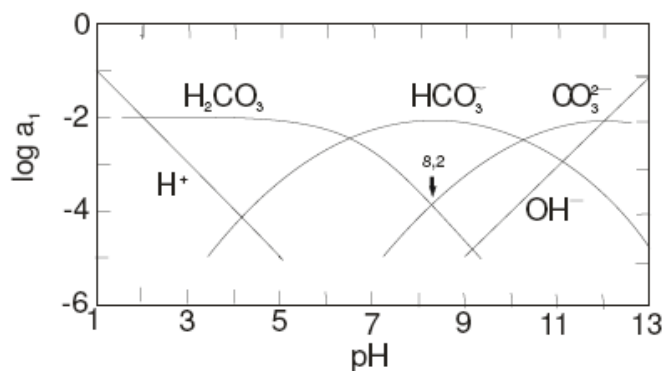
A análise das relações existentes entre as mudanças das concentrações de carbonato e bicarbonato e os valores de pH adquiridos, é apresentada por Kehew (2001) na Figura 4.2.2, onde o diagrama evidencia que essas concentrações elevam com a elevação do pH, em um sistema fechado em que apresenta as concentrações de espécies de carbono inorgânico nesse sistema e sua variação em função do pH. Assim, águas com valores de pH entre 6,0 e 8,2 exibem um predomínio de bicarbonato, como ocorre com os valores obtidos na área estudada por Nossa (2011) e acima desse intervalo o carbonato passa gradativamente a preponderar.

Zublena, Cook e St. Clair (2001) adverte que o nitrogênio presente nas águas subterrâneas pode sugerir contaminação por nitrato (NO_3^-), podendo ocorrer o processo microbiano da nitrificação, quando compostos nitrogenados, no caso a amônia (NH_4^+) se oxida para nitrito (NO_2^-), o qual é convertido para nitrato (NO_3^-) seguidamente, que é a fase final e estável do nitrogênio.

Pode também estar presente nos aquífero cársticos o fluoreto, devido principalmente a presença dos minerais fluorita e apatita, sendo, portanto, a principal fonte da ocorrência de fluoreto natural.

Estudo realizado por Misi (1979) detectou na unidade que denominou de B1 dos calcários do Bambuí, a presença de fluorita nos dolomitos.

Figura 4.2.2 - Concentração de espécies de carbono inorgânico em condições de sistema aberto e sua variação em função do pH



Fonte: Kehew (2001).

Além desses, o sulfato também pode ocorrer nos aquíferos cársticos. No aquífero Salitre em Irecê, conforme Misi (1979), ocorre na unidade B1 descrita por ele, a qual é composta por calcilutitos maciços e calcários oolíticos e psolíticos, com casual episódio de bolsões de sulfetos como pirita e calcopirita disseminados no calcário. Estudos realizados por Valle (2004), nas Bacias de Irecê e Salitre, mostram dados médios de sulfato de 204,30 mg/l sugerindo que o provimento de sulfato dissolvido nessas concentrações no aquífero cárstico dessas áreas tenham oxidado em para sulfetos, especialmente a pirita.

Na região da bacia de Irecê, bem como na Una-Utinga, se verifica o uso do solo para vários tipos de culturas agropastoris, desde culturas de subsistência de pequenas famílias e comunidades, até empresas com grandes plantações exploração do solo. De acordo com Nossa (2011), nos municípios de Irecê e Lapão são desenvolvidas atividades antrópicas potencialmente contaminantes como agricultura irrigada com o uso de agrotóxicos, mineração,

disposição de resíduos sólidos em locais inadequados e problemas relacionados com a ausência de saneamento básico nas zonas urbanas das cidades.

Assim, para a mesma autora, a presença de arsênio em seus estudos pode ser devido ao uso indiscriminado de produtos utilizados nas atividades agrícolas, como fertilizantes e defensivos agrícolas, que contenham arsênio na sua composição. Ou devido, segundo Smedley e Kinniburgh (2002), à presença de bolsões de arsenopirita, os quais podem ocorrer em condições oxidantes, com frequência regiões áridas, onde a salinidade é alta, devido a processos de evaporação.

Os aquíferos cársticos, por sua natureza, possuem cloretos presentes em suas águas. Guerra (1986), em estudos realizados na bacia de Irecê, relacionou os fatores climáticos às elevadas concentrações de cloretos encontradas nas águas. Na porção norte de sua área de estudo, as precipitações são de 400 mm/ano a 600 mm/ano, consideradas baixas, e 79% das águas são cloro-sulfatadas cálcicas, já na porção sul as precipitações são consideradas altas, chegando a 720 mm/ano, de acordo com INMET (2008), e 65% das águas são classificadas como cloro-sulfatada cálcicas, num percentual menor das águas, porém aumentando o percentual de águas bicarbonatadas.

Portanto, as concentrações de cloretos estão inteiramente relacionadas às taxas de evaporação e inversamente relacionadas às taxas de precipitação e infiltração, bem como influenciadas pela existência de fraturas e condutos cársticos. Guerra (1986), verificou essa situação na bacia de Irecê, onde as formas de absorção cársticas variam aumentando a sua frequência da porção norte para a porção sul seguindo os altos índices pluviométricos, assim e, por conseguinte, a redução da concentração de cloretos.

4.2.2 Classificação da Faciologia Hidroquímica das Águas Subterrâneas

A faciologia hidroquímica das águas subterrâneas tem sido apresentada através de representação gráfica, onde é constatada a abundância relativa dos elementos maiores (Ca^{++} , Na^{++} , K^+ , Mg^{++} , SO_4^- , Cl^- e HCO_3^-) que ocorrem nessas águas. Através da representação gráfica se tem rapidamente a avaliação da evolução química da água. Mestrinho (2008), ressalta que esse método indica as diferenças e similaridades entre as amostras ou processos e reações químicas.

Algumas representações gráficas podem caracterizar muito bem a tipologia química das águas, a escolha depende do objetivo de cada estudo. Podem ser apresentadas separada ou conjuntamente, para melhor interpretação dos dados. Representações gráficas como os

diagramas de Piper (PIPER, 1944), dentre outros, classificam as águas associadas a distintos tipos litológicos.

As representações gráficas são importantes ferramentas para expressar visualmente as características e assinaturas das águas, as mesmas foram usadas na região de estudo da bacia de Irecê, onde ocorre o aquífero Salitre. Estudos realizados por Nossa (2011), mostraram, através da elaboração dos diagramas de Piper, que 51,62% das águas analisadas são assinaladas como águas Bicarbonatadas Cálcicas e Mistas e 48,38% exibem características de águas Cloretadas Cálcicas.

Outros estudos foram realizados nas águas subterrâneas da bacia de Irecê, como Beraldo (2005), em estudo isotópico e hidroquímico, que classificou as águas como Bicarbonatadas mistas.

Negrão (1987), ao caracterizar hidroquimicamente as águas subterrâneas na bacia de Irecê, através da interpretação dos diagramas de Piper, verificou que na porção sul da área prepondera as águas do tipo Bicarbonatadas Cálcicas, demonstrando a influência das águas dos quartzitos na composição química. Na porção norte a maioria das águas teve sua tipologia classificada como Cloretadas Sulfatadas Cálcicas, o autor sugere que é devido a influência das águas de recarga dos quartzitos ser menor, além da diminuição das chuvas, causando o enriquecimento em cloretos a partir do mecanismo de evapoconcentração.

Reitera ainda que, na porção Central, ocorre certo equilíbrio no padrão evolutivo das águas, com predominância de águas Bicarbonatadas Cálcicas, como Cloretadas Sulfatadas Cálcicas, com tendência a um enriquecimento em cloretos e apresentando, portanto, um certo equilíbrio entre a qualidade das águas como verificado na área de estudo. Assim, Negrão (1987) indica que ao longo de 20 anos a qualidade das águas na área não sofreu alterações significativas.

Guerra (1986) também contribuiu com estudos, na bacia de Irecê, onde constatou que as águas da região predominantemente são classificadas como Cloretadas Sulfatadas Cálcicas ou Magnesianas (63%) e Bicarbonatadas Cálcicas ou Magnesianas (37%), com acréscimo gradual do teor de cloretos e diminuição do teor de bicarbonatos da porção sul para a porção norte da Bacia.

Já Santos (2008), classificou as águas subterrâneas estudadas na bacia do rio Salitre como Cloretadas Cálcicas e Mistas a Bicarbonatadas Cálcicas, corroborando com a classificação apresentada por Barreto (2006), para a mesma Bacia.

4.3 ISÓTOPOS NA HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

Um elemento químico é considerado isótopo quando possui o mesmo número atômico, porém diferentes números de nêutrons e, conseqüentemente, diferente massa atômica. Assim, a este é condicionado comportamentos distintos, permitindo uma mudança local da abundância relativa entre vários isótopos na natureza, a partir do processo chamado de fracionamento isotópico (CLARK & FRITZ, 1977).

Quanto maior a variação de massa entre isótopos, maior o fracionamento, que pode acontecer por mudança de fase ou estado, diferença na taxa de reação química e diferença na velocidade de difusão molecular (CLARK & FRITZ, 1977).

Os distintos números de massa dos isótopos permitem a sua identificação através da espectrometria de massa e sua aplicação em estudos geológicos e ambientais, sendo possível dimensionar os diferentes isótopos de um mesmo elemento químico (NOSSA, 2011).

Os isótopos, através das análises isotópicas, têm sido usados amplamente em vários estudos, particularmente em hidrologia (SANTOS, 2008). De acordo com Fritz e Fontes (1980) a aplicação de isótopos ambientais, assim chamados por serem achados de forma generalizada no meio ambiente em números que consentem seu uso como traçadores ou marcadores cronológicos, é muito divulgada a nível mundial, estabelecendo atualmente uma ferramenta considerada como tradicional no meio técnico hidrogeológico.

Segundo Clark e Fritz (1997), o uso dos estudos isotópicos em aquíferos já ocorre há muito tempo, pioneiramente por estudos de Urey *et al.* (1951) e Epstein & Mayeda (1953), na década de 50. Para os mesmos autores, hidrológica e hidrogeologicamente, o uso dos isótopos ambientais dá como traçadores dessas águas, em estudos de sua origem ou procedência, localização da área de recarga e determinação do tempo de recarga.

Para Nossa (2011), no Brasil esses estudos ainda são insipientes, especialmente no que tange as águas subterrâneas. A maioria dos estudos hidrológicos envolvendo isótopos apresenta dados a respeito do desempenho do oxigênio e do hidrogênio, a saber: Barbieri *et al.* (2005); Abbott, Lini e Bierman (2000); Aquilina, Ladouche e Dorfliger (2005); Darling e Bath (1998); Huddart, Longstaffe e Crowe (1999); Williams (1997); Yang *et al.* (1999); Philips e Gregg (2003); Frost e Toner (2004); Ojiambo *et al.* (2003); Capo, Stewart e Chadwick (1998). Porém, os estudos hidrológicos podem abarcar outros isótopos existentes na água subterrânea, que podem trazer informações preciosas, como o trítio e o radônio.

De acordo com Charalampides e Monoliades (2002), o uso de técnicas isotópicas, aplicadas para identificar a fonte e o percurso de poluentes em estudos ambientais, tem

aumentado. O estudo de isótopos é considerado por Andreo *et al.* (2003), um dos métodos mais acertados na contribuição da preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

A determinação dos padrões de fluxo de uma área, modo geral, se realiza a partir de pontos onde são medidos os níveis piezométricos da água e a partir dos ensaios de bombeamento são medidas as transmissividades, sem, portanto, ter evidência direta do tipo, origem ou idade da água. Assim, a hidrologia isotópica vem preencher essa lacuna, especialmente por seus principais isótopos ambientais (^3H , ^2H e ^{18}O), nos estudos hidrológicos, representados pelos elementos H e O, serem parte integrante da composição da água (SILVEIRA & SILVA JUNIOR, 2002).

Conforme Carrasco *et al.* (2006), o entendimento a respeito do comportamento da zona insaturada em aquíferos cársticos é de fundamental importância, visto que envolve a compreensão sobre os processos de carstificação, assim como os tipos de rotas hídricas que podem ocorrer no sistema. Bakalowicz (1995) ressalta que variados métodos podem ser aplicados para aferir a zona insaturada em aquíferos cársticos, a saber, a análise da composição isotópica das águas de infiltração.

Silva Junior e Custódio (2010), ressaltam que o entendimento da recarga, curso e composição de aquíferos cársticos-fissurais, de certa maneira, necessita de combinação de técnicas, de acordo com a natureza e as improbabilidades consequentes da carstificação.

Estudos realizados por Kim, Kim e Kim (2011), resultaram, para a maioria dos dados avaliados da água subterrânea em meio cárstico de Gimcheon (Coreia), numa assinatura isotópica das águas meteóricas associada a existência de elevados teores de nitrato, cloreto e sulfato, e baixos valores de fluoreto, considerado devido à recarga por água superficial.

O uso dos isótopos como traçadores por Doctor *et al.* (2006), em estudos nas águas subterrâneas em aquífero cárstico na Eslovênia, foi realizado utilizando a química de íons principais e os isótopos estáveis de água ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), com a intenção de estimar a proporção de mistura entre três fontes: (1) de recarga rio alogênica, (2) de recarga autogênica e (3) um componente antropogênico armazenado dentro do epicarste, a partir de poço de monitoramento, considerando eventos de tempestades.

A aplicação de hidrologia isotópica, aliada à modelagem geoquímica, trouxe bons resultados em estudos realizados por Tallini *et al.* (2014) no aquífero cárstico-fissurado em Gran Sasso, região da Itália, onde se realizou investigação em escalas regionais e locais através de dados isotópicos ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) e modelagem geoquímica para melhorar a compreensão dos processos de recarga e interações água-rocha.

Segundo Silveira e Silva Junior (2002), os estudos com utilização de isótopos

ambientais no Brasil remontam entre o final da década de 60 e início da década de 70, sendo considerados os pioneiros, e tiveram como foco principal o nordeste brasileiro e Amazônia e seguidamente a região sudeste, essencialmente aquífero Botucatu. A seca e salinização das águas do Nordeste foram os principais motivos para a evolução dos estudos isotópicos na região com adesão da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), onde prioritariamente objetivava obter informações sobre a origem e mecanismos de recarga dos aquíferos, o motivo da salinização, tempo de tráfico e a datação desse aquíferos (GAT, MAZOR & MERCADO, 1968; FERREIRA DE MELO *et al.*, 1969; CAMPOS, 1971; PRADO & BEDMAR, 1976; SALATI, LEAL & CAMPOS, 1979).

Vilanueva *et al.* (2014), em estudos no aquífero cárstico Salitre nos municípios de Irecê e Lapão na Bahia, verificou através de análises de isótopos estáveis, que a origem da salinização em suas águas poder ter relação com a interação com a sequência carbonática da formação homônima ao aquífero, bem como através com o processo de evaporação, e também contribuição da transpiração efetuada pelas plantas. Esses resultados foram propostos considerando interpretações nos valores mais altos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e deutério (δD), configurando águas mais evaporadas e submetidas a interação com as rochas calcárias por um intervalo de tempo maior.

Ainda como resultado, o mesmo trabalho constatou que todos os valores obtidos nas análises isotópicas de oxigênio-18, deutério e carbono inorgânico dissolvido são negativos, o que demonstra que são águas empobrecidas em relação ao padrão VSMOW. Ressaltou ainda, em dados históricos da bacia de Irecê, avaliando os mesmos isótopos estáveis, que há valores médios muito próximos encontrados corroborando, com o comportamento isotópico da área. O que revela que não houve uma variação isotópica significativa do aquífero cárstico Salitre ao longo dos últimos 30 anos, na bacia supramencionada.

Para o aquífero cárstico Salitre na BUU não há estudos isotópicos anteriores a essa pesquisa.

4.3.1 Isótopos estáveis

Os isótopos podem estar predispostos a desintegração no tempo, por emissão da radioatividade. Assim, são considerados radioativos ou não radioativos, quando não há desintegração. Denominados também como isótopos instáveis e estáveis, os primeiros alteram sua composição a partir da emissão de partículas em resposta a processos nucleares, portanto ditos também, radioativos. Já os estáveis não alteram sua composição por processos nucleares,

apesar de exibirem variações na composição isotópica originada por processos físico-químicos e biológicos.

Para Faure (1986) e White (1997), o estudo dos isótopos estáveis abarca modificações na composição isotópica dos elementos (C, H, O, N, S etc.) de uma grande variedade de substâncias naturais. Algumas particularidades são comuns a estes elementos, a saber: i) tem massa atômica baixa; ii) grande diferença relativa de massa entre seus isótopos; iii) constituem ligações químicas com alto caráter covalente; iv) existem em mais de estado de oxidação (C, N e S), formam um grande número de compostos (O) e são importantes componentes naturais que ocorrem facilmente em fluidos e sólidos (minerais e rochas) na crosta terrestre, além de fazer parte da maioria das formas de vida; e v) a abundância dos isótopos raros é satisfatoriamente elevada para garantir precisas medidas analíticas.

Segundo Fritz e Fontes (1980), parte dos isótopos não acontecem na natureza em quantidades expressivas ou mensuráveis, a exemplo dos radioativos, alguns só podem ser adquiridos de forma artificial, em laboratório. Os que ocorrem naturalmente e que seguem os ciclos naturais do meio ambiente, como o ciclo hidrológico ou do carbono, por exemplo, são chamados usualmente de isótopos ambientais. De modo geral, no estudo desses tipos de isótopos, habitualmente se centraliza nos isótopos de hidrogênio, (^1H , ^2H , ^3H), carbono (^{12}C , ^{13}C , ^{14}C), nitrogênio (^{14}N , ^{15}N), oxigênio (^{16}O , ^{18}O) e enxofre (^{32}S , ^{34}S), que são considerados os elementos mais importantes nos sistemas biológicos e compartilham na maior parte das reações de interesse hidrogeoquímico.

De acordo com Clark e Fritz (1997), em estudos hidrogeológicos, os isótopos ambientais permitem a indicação de origem, processos de subsuperfície, taxas de reação, reações geoquímicas, qualidade, recarga e contaminação da água subterrânea.

A prescrição do uso de isótopos ambientais estáveis (^2H , ^{13}C , ^{15}N e ^{18}O) e radioativos (^3H e ^{14}C) em Hidrologia, solitariamente ou associada com as técnicas hidrológicas habituais (métodos hidrodinâmicos, hidrogeoquímicos) tem sido crucial na averiguação de problemas hidrogeológicos a exemplo de: reconhecimento de mecanismos de salinização em águas subterrâneas, definição de áreas de recarga, identificação de paleoáguas, avaliação de mistura entre unidades hídricas, datação dos recursos hídricos (tempo de trânsito, definição de linhas de fluxo etc.) e a origem de fontes poluidoras (matéria orgânica e/ou fertilizantes) (ARAGUÁS & GONFIANTINI, 1989; BLAVOUX *et al.*, 1993; CARREIRA, 1998; GIBSON *et al.*, 2003; PILLA *et al.*, 2003; PLUMMER, 1993), corroborando com a importância desse estudo para os aquíferos. Muitas vezes utilizados em meios cársticos, diante da natureza desse ambiente à vulnerabilidade.

Lambén *et al.* (2015) realizaram estudos em aquíferos cársticos de alta altitude em ambientes geológicos complexos, através do uso de isótopos e hidrogeoquímica, no Parque Nacional de Ordesa e Monte Perdido, porção norte da Espanha. Alguns resultados foram que os isótopos estáveis na água ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) mostraram que as frentes oceânicas do Oceano Atlântico são responsáveis pelos altos níveis de precipitação. Verificaram também que a composição isotópica do sulfato dissolvido sugere a existência de fluxos regionais misturados com a descarga local em algumas das nascentes verificadas na área. E ressaltam ainda o importante papel desempenhado pela diferença de altitude entre as zonas de recarga e descarga no controle da química e da variabilidade vertical da composição isotópica em aquíferos cársticos de alta altitude.

O uso dos isótopos estáveis em pesquisas é bem aplicado devido a diferença de massas existentes entre os mesmos, além do fracionamento, possibilitando reconhecer os distintos isótopos de um mesmo elemento. O fracionamento dos elementos ocorre quando da mudança de estado e reações químicas, ocasionando, portanto, uma divisão de isótopos, que pode ser entre duas substâncias ou fases de uma mesma substância (a exemplo da água e vapor) fornecendo distintas razões isotópicas.

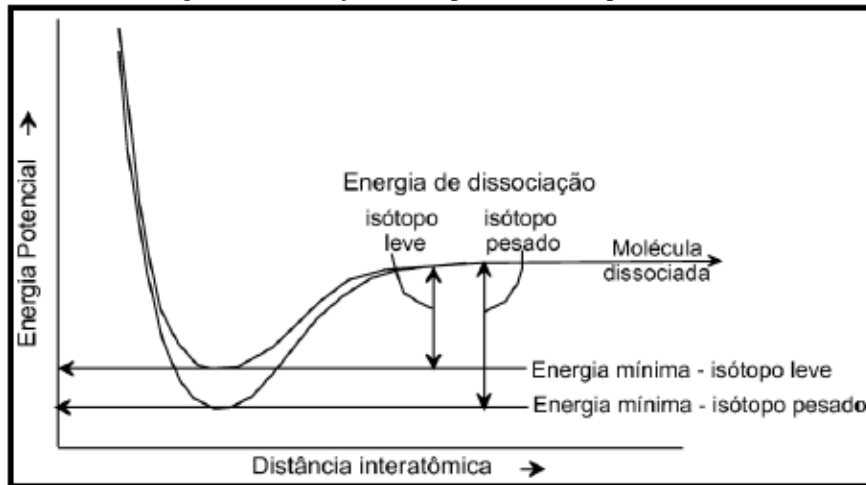
Os isótopos de um mesmo elemento químico apresentam diferenças no comportamento químico e físico. Assim, os processos físicos e químicos ambientais, conhecidos como fracionamentos isotópicos, promovem a separação parcial dos isótopos leves e pesados, conforme as diferenças na intensidade da energia de ligação de isótopos de mesmo elemento químico.

Desta forma, os isótopos mais pesados possuirão uma ligação mais forte e necessitarão de mais energia para dissociar, diante dos mais leves (Figura 4.3.1).

O fracionamento ocorre naturalmente, de acordo com Mook e Vries (2001), por processo de equilíbrio e o cinético/não equilíbrio. Quando em equilíbrio, acontecem reações de trocas isotópicas de acordo com distintas fases de um composto e uma taxa que se mantêm em equilíbrio.

Para Faure e Mensing (2005) é a temperatura e, especialmente, a diferença de massa dos isótopos que controlam o fracionamento. Martinelli *et al.* (2009) corroboram e ressaltam que a temperatura possui grande influência no fator de fracionamento, em especial durante a mudança de estado físico da água que ocorra em equilíbrio termodinâmico.

Figura 4.3.1 - Relação entre a energia potencial e a distância entre os átomos para isótopos pesados e leves de uma molécula. A energia de dissociação difere para dois isótopos, e afeta as taxas de reação.



Fonte: Clark e Fritz (1997).

Desta forma a composição ou razão isotópica (**R**) de um elemento químico, verificada por espectrometria de massa, é expressa pela relação entre os isótopos mais raro e o mais abundante, exemplos na Tabela 4.3.1. O fracionamento resultante da reação de troca em situação de equilíbrio entre duas substâncias *A* e *B* pode ser representado pelo fator de fracionamento (α) conforme expressão na Equação 6, onde *R* representa a razão do isótopo mais pesado (R_A) em relação ao isótopo mais leve (R_B) (CLARK E FRITZ, 1997).

$$\alpha \frac{A}{B} = \frac{R_A}{R_B} \quad (6)$$

Clark e Fritz (1997) advertem que a interpretação de **R** absoluta é complicada, sendo, por sua vez, representada de forma relativa pelo desvio da sua medida na amostra (Ramostra) e a **R** aferida em um padrão de referência (Rpadrão). A **R** pode ser determinada segundo a expressão na Equação 7, em parte por mil (‰) (Ver Tabela 4.3.1). O padrão adotado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), para os isótopos de oxigênio e deutério, é o *Vienna – Standard Mean Ocean Water (VSMOW)*, que faz referência a mistura entre as águas dos cinco oceanos, sendo a este atribuído o valor de 0‰.

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \cdot 1000 \quad (7)$$

Ainda para Clark e Fritz (1997), o fracionamento acontece em qualquer reação termodinâmica como fusão, solidificação, evaporação e condensação, devido às distintas taxas

das reações para distintas espécies moleculares, resultando numa concentração desigual de um isótopo em relação a outro. Kendall e Doctor (2003) ressaltam que os processos químicos e físicos podem ser apreciados como reações de equilíbrio reversíveis ou reações cinéticas unidirecionais irreversíveis, ocorrendo das duas formas o fracionamento isotópico.

Tabela 4.3.1 - Abundâncias médias dos isótopos estáveis e razões isotópicas no padrão de referência.

Elemento	Isótopos	Abundância (em átomos‰)	Razão (R)	Padrão	Razão (R) no padrão (δ)
Oxigênio	^{16}O	99,76	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	VSMOW*	$2.0052 \cdot 10^{-3}$
	^{17}O	0,037			
	^{18}O	0,199			
Hidrogênio	^1H	98,98	$^2\text{H}/^1\text{H}$	VSMOW*	$1.5575 \cdot 10^{-4}$
	^2H ou D (deutério)	0,02			

Legenda:* *Vienna Standard Mean Ocean Water* (VSMOW). Dados obtidos de Clark e Fritz (1997); Martinelli *et al.*, (2009).

Fonte: Modificado de Gonçalves (2014).

4.3.2 Isótopos de Oxigênio e hidrogênio, desempenho em meio aquoso

A molécula da água é formada por um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, o oxigênio, que combinado com o hidrogênio constitui essa molécula. Esses elementos de modo respectivo apresentam: três isótopos estáveis ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O e dois isótopos estáveis ^1H e ^2H (deutério) e são considerados traçadores. Desta forma, as moléculas de água se apresentam em nove tipos de configurações isotópicas, a saber: $\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$, $\text{H}_2\ ^{17}\text{O}$, $\text{H}_2\ ^{18}\text{O}$, HD^{16}O , HD^{17}O , HD^{18}O , $\text{D}_2\ ^{16}\text{O}$, $\text{D}_2\ ^{17}\text{O}$, $\text{D}_2\ ^{18}\text{O}$.

Epstein e Mayeda (1953) e Friedman (1953) foram os pioneiros a efetivar estudos isotópicos em águas naturais usando as razões, respectivamente: ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) e ($^2\text{H}/^1\text{H}$).

Os estudos desenvolvidos com base em informações isotópicas em aquíferos, na maioria das vezes utilizam o ^{18}O , para conseguir dados a respeito de áreas de recarga e processo de fracionamento (LOUSADA & CAMPOS, 2011). O ^{18}O e o ^2H podem ser usados para identificar se uma contaminação salina é marinha ou não, devido às águas salinas originadas por processo de evaporação serem facilmente diferenciadas das águas marinhas (COSTA FILHO *et al.*, 1998).

A proporção referente entre isótopos de um dado elemento determina a composição isotópica (CLARK & FRITZ, 1997).

O oxigênio e o hidrogênio, durante a evaporação e condensação, ocorrem

proporcionalmente ao fracionamento isotópico (HOEFS, 1973). O mesmo autor verificou que existem diferenças constantes nas pressões de vapor entre as moléculas H₂O e HDO e entre as moléculas H₂¹⁶O e H₂¹⁸O. Sugerindo que as proporções dos isótopos ¹⁸O e D são semelhantes durante estes processos, cuja a correlação foi entendida por Craig (1961), o qual publicou a equação da reta meteórica ou linha meteórica global (GMWL – *Global Meteoric Water Line*), representada pela expressão matemática (Equação 8) que concede previsão da composição isotópica da água meteórica.

$$\delta^2H = 8. \delta^{18}O + 10\text{‰} SMOW \quad (8)$$

O desempenho dos isótopos da molécula de água pode então seguir o modelo baseado equação, definida pela expressão matemática da Equação 9, a qual foi expressa graficamente a partir da compilação e correção de dados de Rozanski, Araguás e Gonfiantini (1993), por Clark e Fritz (1997) para o padrão V-SMOW, nomearam a Verdadeira Linha Meteórica Global (*True Meteoric Water Line*) para previsões da composição isotópica das precipitações, com valores mais empobrecidos para regiões de maiores latitudes, assim com composição da água meteórica sendo previsível.

A GMWL determina a relação de ¹⁸O e D para águas superficiais de todo mundo. (Equação 9).

$$\delta^2H = 8,17(\pm 0,07). \delta^{18}O + 11,27(\pm 0,65)VSMOW \quad (9)$$

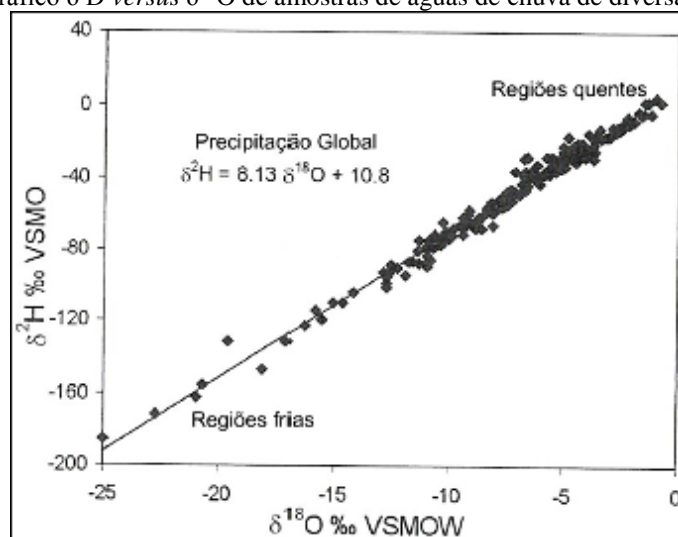
A GMWL determina a relação de ¹⁸O e D para águas superficiais de todo mundo. (Figura 4.3.2).

Segundo Sidle (1998), as composições isotópicas do oxigênio ($\delta^{18}O$) e hidrogênio (δD) em água, alteradas por processos meteóricos, são traçadores úteis para determinar origem e circulação da água subterrânea devido ao fato dessas composições isotópicas em águas subterrâneas não variarem com o resultado de interações água-rocha a temperaturas baixas. Para Santos (2008) a evaporação e a condensação são os fenômenos naturais que cooperam intensamente com as variações nas composições isotópicas.

Scozzari e Dotsika (2015) ressaltam que a composição isotópica da água de chuva é modificada a partir de processos meteóricos, resultando em uma assinatura isotópica específica nas águas de recarga de aquíferos, que funciona como traçador da origem das águas subterrâneas.

As águas de precipitação são conhecidas como águas meteóricas, procedentes especialmente da evaporação das águas dos oceanos, águas superficiais e precipitam de várias formas (chuva, neve, granizo etc.) através do processo de circulação atmosférica.

Figura 4.3.2 - Gráfico δD versus $\delta^{18}O$ de amostras de águas de chuva de diversas partes do mundo



Fonte: Rozanski *et al.* (1993).

Para Clark e Fritz (1997), a variação de alguns parâmetros geográficos, descritos a seguir, numa dada localidade, pode impactar na evolução da composição isotópica das águas naturais superficiais e subterrâneas durante o ciclo hidrológico, a exemplo latitude, altitude, continentalidade (distância à costa) (Figura 4.3.3), além da quantidade de precipitação.

Para a latitude, diante da relação entre o isótopo de oxigênio ($\delta^{18}O$) e a temperatura, é esperada que em altas latitudes, a exemplo de regiões próximas ao polo, ocorram razões isotópicas mais empobrecidas em $\delta^{18}O$, ou seja, valores mais negativos, do que em regiões de baixas latitudes a exemplo de regiões próximas ao Equador. Assim, os valores do $\delta^{18}O$ são mais negativos nos polos do que nos trópicos.

Para a altitude, em regiões com altas ou baixas altitudes, a chuva orográfica acontece quando a massa de vapor ascendente na paisagem resfria adiabaticamente, por expansão, originando a chuva. Assim, em altas altitudes, em que as temperaturas são menores, as chuvas ocorrem empobrecidas em isótopos pesados. Desta forma, com o aumento de altitude, para o valor do $\delta^{18}O$, o empobrecimento varia de $-0,15\%$ a $-0,5\%$ a cada 100 metros, já para o δ^2H a diminuição é de -1% a 4% . Pode-se observar que, com esta análise, se pode fazer a distinção das águas subterrâneas recarregadas a elevadas altitudes, de águas recarregadas a baixas altitudes, ou fontes provenientes de altas ou baixas latitudes.

Para a continentalidade, a chuva é propícia diante da influência da massa de ar. Nas

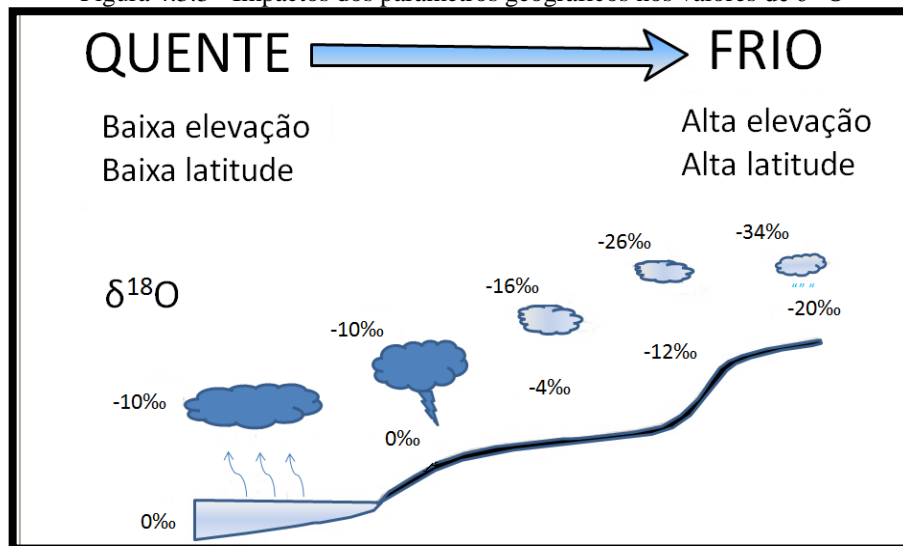
regiões costeiras as precipitações são isotopicamente enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ (valores tendem a ser mais positivos), enquanto que nas regiões interiores, adentrando o continente, consideradas mais frias, ocorrem precipitações isotopicamente empobrecidas (valores mais negativos) em $\delta^{18}\text{O}$, com fortes variações sazonais.

E para a quantidade de precipitação, Dansgaard (1964), ressalta que existe uma relação entre a quantidade de precipitação e o $\delta^{18}\text{O}$. Moser (1980), adverte que quanto maior for a precipitação, mais empobrecida se torna a razão isotópica, ressaltando que o valor residual fica mais empobrecido. Portanto, as primeiras precipitações que ocorrem são mais enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ do que as últimas.

Os valores do $\delta^{18}\text{O}$ e do δD têm predisposição a se tornarem mais negativos quanto maior for a distância às fontes de vapor na atmosfera, ou seja, da região equatorial para a polar, e da região costeira para dentro do continente (Figura 4.3.3), Salati *et al.* (1971), constataram a influência desses efeitos nas composições isotópicas dos isótopos supramencionados de águas de chuvas do nordeste brasileiro.

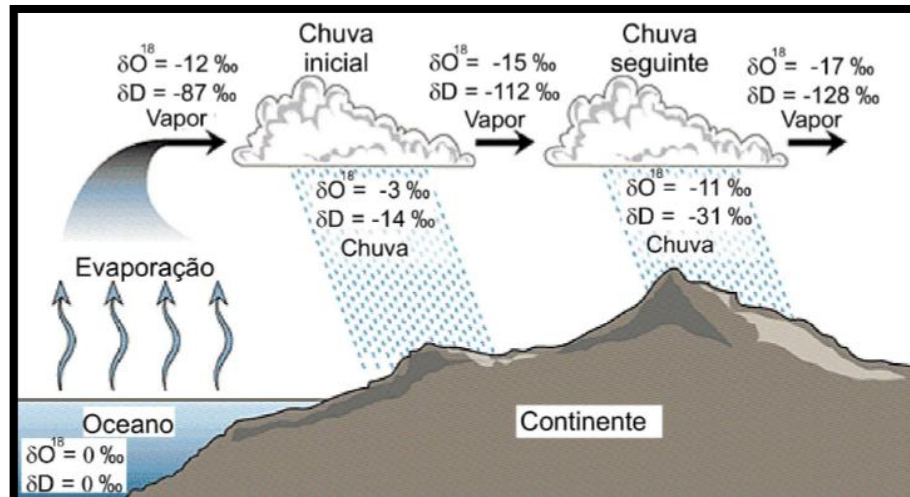
Santiago, Frischkorn e Silva (2008) ressaltam que a composição isotópica reflete as variações de estado físico sofrida como a evaporação e a condensação (Figura 4.3.4), e, em menor escala, aos processos químicos, biológicos ou de troca.

Figura 4.3.3 - Impactos dos parâmetros geográficos nos valores de $\delta^{18}\text{O}$



Fonte: Traduzido e modificado de Aravena (2006).

Figura 4.3.4 - Composições isotópicas da molécula de água de uma massa de vapor d'água que foi formada sobre a superfície do oceano



Fonte: Hoefs (1973); Coplen, Kendall e Hopple (1983).

4.4 PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO AQUÍFERO CÁRSTICO

Os aquíferos cársticos são ambientes hidrogeológicos com altas anisotropia e heterogeneidade, resultados do seu arcabouço geométrico que interfere nas características hidráulicas, e na potencialidade dos mesmos.

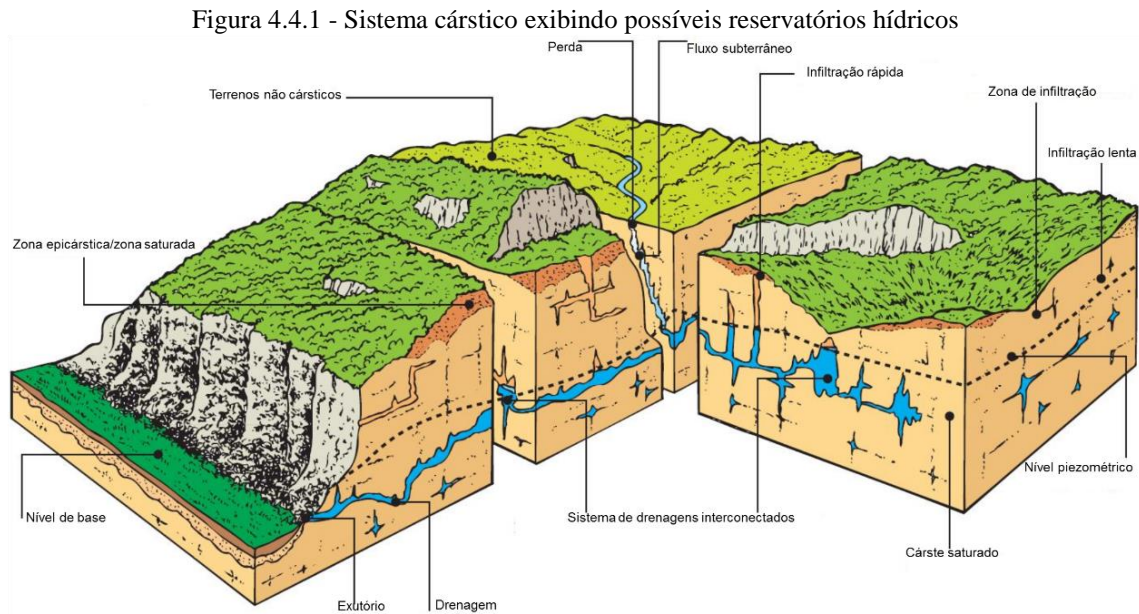
Modo geral, o desenvolvimento da carstificação e interconexões dos condutos, permitem a evolução de feições cársticas como dolinas, sumidouros, dentre outras, subordinadas à percolação da água nos sistemas de faturamento. Assim, os aquíferos cársticos são de grande importância hidrogeológica, constituindo importantes reservatórios e, de maneira geral, com boa potencialidade hídrica (Figura 4.4.1).

A natureza geológica dos aquíferos e padrão de deformação interferem no nível de porosidade secundária e produtividade dos aquíferos (SINGHAL & GUPTA, 2010).

Os aquíferos cársticos apresentam porosidade associada às fraturas. As rochas que compõem esses aquíferos são susceptíveis aos fenômenos de faturamento e são vulneráveis ao processo de carstificação. Permitindo, portanto, que a porosidade seja aumentada, conferindo uma maior capacidade de reserva a este aquífero.

Ford (1971), ressalta que estes aquíferos são resultados do conjunto de transformações químicas e físicas que ocorrem em uma região de rochas carbonáticas em

consequência da circulação da água neste meio, e a interação água-rocha, favorecida principalmente por contribuições pluviométricas.



Fonte: Adaptado de Mangin (1975).

A forma particular de percolação das águas se deve à variabilidade espacial das anisotropias existentes, o que acarreta modificações na permeabilidade e capacidade de infiltração, sendo maior nos meios cársticos que em outros meios permeáveis (SILVA, 2002). Essas peculiaridades estão diretamente associadas aos parâmetros hidráulicos, tais como capacidade específica – Sc e Transmissividade - T .

A Sc é definida como a produtividade do poço por unidade de declínio/perda no nível piezométrico (MACE, 2001), determinada pela Equação 11.

$$Sc = \frac{Q}{S_w} \quad (11)$$

Onde Q é a taxa de bombeamento, vazão em (comprimento³/tempo), e S_w é o rebaixamento medido (mudança ou perda no nível piezométrico) em unidade de comprimento. É uma função das propriedades hidráulicas do aquífero.

A relação de Sc com a T (Sc versus T), vem se tornando cada vez mais usual em meio à pesquisadores, especialmente por dados de Sc (vazão/rebaixamento) serem mais

abundantes do que testes de rebaixamentos, permitindo que a relação de Sc com T aumente o número de estimativa de T em um aquífero de forma relevante (MACE, 2001).

Para El-Naga (1994), a Sc dos aquíferos cársticos, influencia em sua morfologia, refletindo em diferentes graus de evolução da carstificação e conseqüentemente nas potencialidades hídricas.

4.4.1 Métodos empíricos

Relacionar a Transmissividade – T com a Capacidade específica – Sc estatisticamente com uso de pares de valores tanto de T como de Sc, constitui-se num método empírico muito utilizável. O uso dos dados de Sc para a estimativa dos dados de T, possibilita uma aferição mais rigorosa das propriedades hidráulicas de um aquífero regional, bem como melhor compreensão dos sistemas de fluxo do aquífero.

A abordagem empírica envolve a construção de um Modelo de Regressão Linear e conta com alguns atributos necessários para determinação do modelo, a saber: (i) compilar todas as informações dos testes de bombeamento do aquífero que estiverem disponíveis, (ii) definir os valores de transmissividade e a capacidade específica para cada poço, (iii) usar regressão linear para determinar a reta que melhor se ajusta aos pares de valores de T e Sc; (iv) calcular a incerteza na regressão linear (MACE, 2001).

A estimativa da transmissividade através da capacidade específica com modelo de regressão linear – MRL tem sido estudada em diferentes aquíferos (Tabela 4.4.1), especialmente em aquíferos cársticos, tais como: Fabbri (1997), Mace (1997), Verbovsek (2008), Mustafa e Lawson (2002), El-Naqa (1994), os quais aferem o uso deste modelo.

A relação é geralmente estabelecida entre log-transformado (valores em Log) valores de transmissividade (Log T), e log-transformado valores de capacidade específica (Log Sc), porque transmissividade e capacidade específica são geralmente distribuídos em escala log, e nesse caso. Usando relações Log-Log os resultados de coeficiente de correlação são melhores do que aqueles resultados sem transformar para escala Log-Log (RAZACK & HUNTLEY, 1991; EL-NAQA, 1994).

Além disso, é possível realizar a variografia dos dados de Log($T_{empírica}$), onde elabora-se um modelo geostatísticos com uso do método de interpolação probabilístico Krigagem Ordinária, que Fabbri (1997) e Razack e Lasm (2007) apontam como o melhor método para interpolar dados hidrogeológicos.

Tabela 4.4.1 – Estudos relevantes de T obtida da forma empírica

Autor	Modelo analítico					
	Aquífero	Localização	Sc	T	Modelo	R ²
Fabbri (1997)	Cárstico	Noroeste da Itália	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T=0,85(Sc)^{1,07}$	0,95
Jalludin e Razack (1991)	Vulcanoclástico	Djibuti, Hom of África	Rebaixamento	Cooper-Jacob,	$T=2,99(Sc)^{0,938}$	0,82
Razack e Lasm (2004)	Cristalino	Man Danane, Ivory Coast	Rebaixamento	Theis Recovery	$T=0,33(Sc)^{1,30}$	0,88
Mace (1997)	Cárstico	Edwards-TX, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T=0,76(Sc)^{1,08}$	0,8
Mace (1997)	Cárstico	Flórida, EUA	Escalonado	Cooper-Jacob	$T=1,23(Sc)^{1,05}$	0,89
Verbovsek (2008)	Cárstico	Eslovênia	Vazão constante	Dupuit-Thiem	$T=2,39(Sc)^{1,07}$	0,8
Mustafa e Lawson (2002)	Cárstico	Sudoeste da Austrália	Vazão constante	Theis Recovery	$T=3,95(Sc)^{0,89}$	0,82
Hamm <i>et al.</i> (2005)	Vulcanoclástico	Jeju, Coreia	Vazão constante	Moench	$T=0,99(Sc)^{0,89}$	0,94
El-Naqa (1994)	Cárstico	Aquífero Ammam-Wadi Sir, Jordânia	Vazão constante	Huntush	$T=1,81(Sc)^{0,917}$	0,95
Galvão (2015)	Cárstico	Sete Lagoas –MG, Brasil	Rebaixamento	Thiem	$T=330(Sc)^{0,21}$	0,55
Eagon e Johe (1972)	Cárstico	Noroeste de Ohio, EUA	Rebaixamento	Thais, Cooper-Jacob	$T=3,24(Sc)^{0,81}$	0,8
Gonçalves e Leal (2017)	Cárstico	Aquífero Salitre, Irecê-Ba, Brasil	Rebaixamento	Theis Recovery	$T=05(Sc)^{1,18}$	0,844

Fonte: Elaboração própria.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Visando associar todas as informações e dados nesse estudo, considerando atingir os objetivos propostos, os resultados serão apresentados nesse capítulo.

5.1 HIDROQUÍMICA DO CARSTE NA BACIA UNA-UTINGA

A hidroquímica em águas subterrâneas leva em consideração a relação da interação água/rocha, bem como a relação da água com o solo durante sua infiltração. Nesta pesquisa a hidroquímica dessas águas na Bacia Una-Utinga – BUU, poderou, a relação das mesmas com a interação com o ambiente cárstico, o aquífero cárstico Salitre.

5.1.1 Fácies hidroquímicas

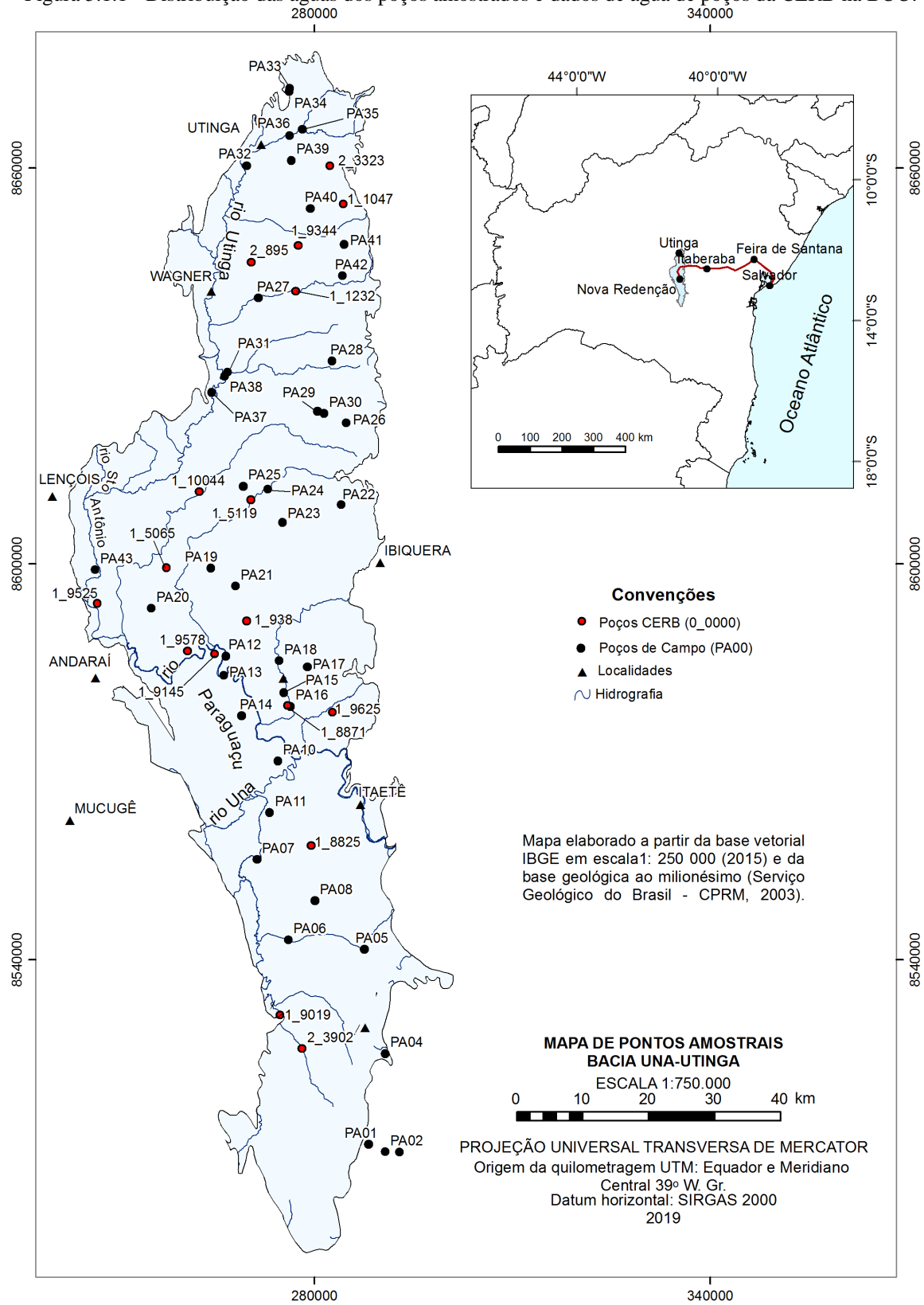
As análises hidroquímicas das águas dos poços na BUU englobam 35 amostras de água coletadas em campo, e 17 amostras do banco de dados da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia - CERB, totalizando 52 amostras distribuídas na BUU (Figura 5.1.1).

Os resultados dessa análise hidroquímica pode ser verificado na Tabela 5.1.1.

As coletas de água foram realizadas no aquífero cárstico Salitre, sem diferenciação segundo as unidades geológicas que compõe a Formação Salitre na área de estudo, Unidade Gabriel/Nova América e Unidade Nova América subunidade Lapão, a qual abriga o aquífero homônimo, objeto desse estudo, assim não há separação do aquífero em que as mesmas foram coletadas.

As descrições dos perfis de poços executados pela CERB não apresentam informações, que diferenciam as Unidades que compõem a Formação Salitre, na BUU, apresentam apenas como rocha carbonáticas ou calcário, sem descrições e/ou separações.

Figura 5.1.1 - Distribuição das águas dos poços amostrados e dados de água de poços da CERB na BUU.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.1.1 - Dados hidroquímicos

Amostra	Lat	Long	Na (mg/L)	K(mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	C (mg/L)	Cl (Meq/L)	CO3(mg/L)	HCO3(mg/L)	HCO3(meq/L)	RAZAO (Meq)
PA01	8512063	288208	262,00	16,10	100,10	95,80	581,00	16,38	1,50	116,00	1,89	0,90
PA02	8510893	290737	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
PA04	8525782	290737	14,60	4,90	2,90	14,90	93,30	2,63	1,50	168,00	2,74	0,49
PA05	8541576	287612	146,70	5,92	124,80	148,40	1012,00	28,54	1,50	241,00	3,93	0,88
PA06	8543015	276066	83,00	10,20	34,60	37,40	78,70	2,22	1,50	235,00	3,83	0,37
PA07	8555166	271302	19,30	0,19	23,90	11,60	35,60	1,00	1,50	135,00	2,20	0,31
PA08	8548965	280109	61,40	4,12	42,60	28,00	132,30	3,73	1,50	231,00	3,77	0,50
PA10	8570096	274473	131,70	0,70	26,70	45,60	264,40	7,46	1,50	150,00	2,45	0,75
PA14	8576956	268961	14,70	0,70	14,40	34,60	10,90	0,31	1,50	166,00	2,71	0,10
PA15	8580462	275385	439,00	2,80	166,80	123,80	828,70	23,37	1,50	182,00	2,97	0,89
PA16	8578396	276424	62,90	5,60	80,20	45,20	308,90	8,71	1,50	121,00	1,97	0,82
PA17	8584320	278961	73,20	4,50	51,30	28,70	187,30	5,28	1,50	184,00	3,00	0,64
PA18	8585291	274661	67,70	6,10	59,50	31,10	156,60	4,42	1,50	185,00	3,02	0,59
PA19	8599343	264346	16,10	3,80	14,60	32,90	29,50	0,83	1,50	176,00	2,87	0,22
PA20	8593223	255280	13,00	1,10	11,90	18,00	9,90	0,28	1,50	168,00	2,74	0,09
PA21	8596606	268059	10,30	3,00	19,30	28,30	17,80	0,50	1,50	259,00	4,22	0,11
PA22	8608934	284107	30,70	8,40	16,90	25,40	38,30	1,08	1,50	237,00	3,86	0,22
PA23	8606289	275221	123,00	2,80	21,50	43,50	150,40	4,24	1,50	183,00	2,98	0,59
PA24	8611296	273000	109,20	6,30	73,60	45,20	255,20	7,20	1,50	170,00	2,77	0,72
PA25	8611756	269197	45,90	1,50	23,00	13,00	58,30	1,64	1,50	181,00	2,95	0,36
PA26	8621365	284854	124,00	7,40	29,60	22,70	65,00	1,83	1,50	162,00	2,64	0,41
PA27	8640250	271479	37,80	7,80	24,40	22,80	65,90	1,86	1,50	249,00	4,06	0,31
PA28	8630725	282667	182,90	2,30	7,20	13,00	22,90	0,65	1,50	193,00	3,15	0,17
PA29	8623083	280466	294,60	3,10	280,50	91,50	14,10	0,40	1,50	136,00	2,22	0,15
PA30	8622799	281504	35,40	8,00	30,00	71,50	181,20	5,11	1,50	212,00	3,46	0,60
PA31	8629014	266855	37,90	0,19	34,20	13,00	42,80	1,21	1,50	169,00	2,75	0,30
PA34	8671556	276235	17,60	3,60	10,40	12,70	18,30	0,52	1,50	89,90	1,47	0,26
PA35	8665813	278162	26,10	2,00	10,40	18,60	11,90	0,34	1,50	125,00	2,04	0,14

Amostra	Lat	Long	Na (mg/L)	K(mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	C (mg/L)	Cl (Meq/L)	CO3(mg/L)	HCO3(mg/L)	HCO3(meq/L)	RAZAO (Meq)
PA36	8664848	276276	17,40	2,70	14,50	19,00	10,90	0,31	1,50	130,00	2,12	0,13
PA37	8625978	264477	28,50	2,50	16,10	18,40	24,50	0,69	1,50	142,00	2,31	0,23
PA38	8628458	266433	20,20	0,90	10,90	9,90	18,00	0,51	1,50	81,00	1,32	0,28
PA39	8661141	276536	94,80	3,90	31,90	56,90	164,70	4,64	1,50	326,00	5,31	0,47
PA40	8653813	279411	111,50	6,00	69,30	53,50	64,00	1,80	1,50	148,00	2,41	0,43
PA41	8648374	284551	184,80	0,80	302,50	67,40	21,20	0,60	1,50	86,00	1,40	0,30
PA42	8643647	284256	117,60	4,60	26,30	44,60	139,00	3,92	1,50	162,00	2,64	0,60
PA43	8599071	246766	27,10	0,50	18,10	16,10	20,50	0,58	1,50	204,00	3,33	0,15
1_5065	8599397	257614,3	9,60	3,10	125,72	21,00	23,62	0,67	8,97	174,89	2,85	0,19
1_9525	8594033	247081,6	10,00	2,00	207,00	9,24	15,00	0,42	0,00	246,00	4,01	0,10
1_5119	8609678	270390,2	14,00	3,00	220,00	31,10	30,90	0,87	0,00	303,00	4,94	0,15
1_10044	8610915	262571,4	11,00	6,00	286,00	26,00	85,00	2,40	0,00	262,00	4,27	0,36
1_9019	8531585	274807,3	10,00	3,00	246,00	14,60	10,40	0,29	0,00	284,00	4,63	0,06
2_3902	8526529	278142,8	13,00	7,24	302,00	26,00	15,20	0,43	0,00	349,00	5,69	0,07
1_8871	8578496	275960,7	7,20	1,40	161,00	29,10	9,07	0,26	35,60	217,00	3,54	0,07
1_8825	8557272	279507,4	450,00	5,00	2006,00	219,00	2070,00	58,37	0,00	242,00	3,94	0,94
1_1232	8641268	277182,2	13,20	13,38	346,00	11,43	35,50	1,00	0,00	369,50	6,02	0,14
1_9145	8586290	264910,6	40,50	4,50	290,00	62,40	144,00	4,06	16,70	273,00	4,45	0,48
1_9565	8577516	282727,1	130,00	5,00	720,00	90,40	711,00	20,05	0,00	265,00	4,32	0,82
1_9578	8586753	260764,2	8,50	2,40	147,00	24,50	15,20	0,43	16,30	210,00	3,42	0,11
1_938	8591352	269723,6	97,00	3,48	516,00	64,18	200,00	5,64	0,00	412,00	6,72	0,46
1_1047	8654477	284400	9,28	4,96	45,00	54,21	21,00	0,59	0,00	478,00	7,79	0,07
2_3323	8660301	282358,5	3500,00	24,00	453,00	93,10	5760,00	162,43	0,00	257,00	4,19	0,97
2_895	8645642	270437,6	42,00	5,00	250,00	34,00	37,90	1,07	0,00	311,00	5,07	0,17
1_9344	8648205	277552,8	16,00	8,00	264,00	19,00	52,10	1,47	0,00	261,00	4,25	0,26

*recipiente para análise hidroquímica quebrou

Amostra	Lat	Long	STD(mg/L)	rCl/rHCO3	Sulfato(mg/L)	NitroT(mg/L)	CE µS/cm	Salini%	pH	T °C	OD (mg/L)
PA01	8512063	288208	1550,00	8,67	65,40	0,90	2420,00	0,12	6,05	30,00	2,44
PA02	8510893	290737	2960,00	*	*	*	462,00	0,25	6,39	28,00	1,07
PA04	8525782	290737	504,00	0,96	11,40	5,00	787,00	0,04	7,06	25,88	1,85
PA05	8541576	287612	1850,00	7,26	24,40	8,20	2890,00	0,15	6,45	23,69	3,94
PA06	8543015	276066	744,00	0,58	30,90	23,40	1160,00	0,06	6,53	27,99	2,97
PA07	8555166	271302	253,00	0,46	9,30	2,30	552,00	0,03	7,12	30,13	1,20
PA08	8548965	280109	797,00	0,99	52,90	6,00	1250,00	0,06	6,20	29,31	3,01
PA10	8570096	274473	931,00	3,05	7,30	13,00	1460,00	0,04	6,31	26,93	1,85
PA14	8576956	268961	401,00	0,11	8,30	0,80	626,00	0,03	6,47	27,12	3,54
PA15	8580462	275385	2220,00	7,88	342,90	30,30	3470,00	0,18	6,77	26,43	1,58
PA16	8578396	276424	1090,00	4,42	58,90	15,70	1710,00	0,09	6,66	30,54	1,64
PA17	8584320	278961	757,00	1,76	20,80	2,90	1180,00	0,06	6,50	26,76	2,97
PA18	8585291	274661	830,00	1,46	28,50	29,00	1300,00	0,06	6,60	28,46	2,30
PA19	8599343	264346	456,00	0,29	19,70	3,40	713,00	0,03	6,84	28,75	1,16
PA20	8593223	255280	300,00	0,10	1,20	0,80	462,00	0,02	6,86	26,18	2,35
PA21	8596606	268059	430,00	0,12	11,40	1,70	672,00	0,03	7,16	28,08	2,01
PA22	8608934	284107	448,00	0,28	17,00	0,20	700,00	0,03	7,24	27,06	3,14
PA23	8606289	275221	597,00	1,42	137,60	14,80	932,00	0,05	7,15	27,56	1,93
PA24	8611296	273000	1060,00	2,60	45,20	32,40	1660,00	0,08	6,89	28,05	2,06
PA25	8611756	269197	407,00	0,56	17,50	3,40	637,00	0,03	7,22	28,89	1,60
PA26	8621365	284854	496,00	0,69	50,60	0,30	776,00	0,04	6,85	26,83	1,21
PA27	8640250	271479	598,00	0,46	22,30	3,70	934,00	0,05	6,97	25,96	3,29
PA28	8630725	282667	387,00	0,21	58,60	0,20	604,00	0,03	7,40	27,76	1,55
PA29	8623083	280466	1720,00	0,18	1092,00	0,30	2690,00	0,14	7,22	28,89	1,60
PA30	8622799	281504	848,00	1,48	56,10	9,20	1320,00	0,07	6,78	23,53	1,99
PA31	8629014	266855	383,00	0,44	7,90	0,20	599,00	0,03	7,30	29,16	2,93
PA34	8671556	276235	176,00	0,35	1,30	1,50	271,00	0,01	6,27	24,93	2,05
PA35	8665813	278162	222,00	0,16	5,90	0,40	341,00	0,02	7,69	26,08	3,23

Amostra	Lat	Long	STD(mg/L)	rCl/rHCO3	Sulfato(mg/L)	NitroT(mg/L)	CE µS/cm	Salini%	pH	T °C	OD (mg/L)
PA36	8664848	276276	207,00	0,15	2,90	0,60	318,00	0,02	6,27	24,93	2,05
PA37	8625978	264477	310,00	0,30	3,50	1,00	478,00	0,02	7,61	26,64	2,11
PA38	8628458	266433	168,00	0,38	2,50	0,20	259,00	0,01	6,34	24,93	1,57
PA39	8661141	276536	873,00	0,87	56,30	13,90	1360,00	0,07	6,68	26,63	1,85
PA40	8653813	279411	820,00	0,75	323,30	0,30	1280,00	0,06	7,12	29,96	1,05
PA41	8648374	284551	1750,00	0,43	1517,00	0,40	2730,00	0,14	7,28	28,00	1,00
PA42	8643647	284256	648,00	1,48	64,60	0,60	1010,00	0,05	7,36	27,17	1,17
PA43	8599071	246766	406,00	0,17	30,10	0,20	634,00	0,03	7,05	26,06	3,28
1_5065	8599397	257614,3	260,00	0,23	6,00	0,20	400,00	211,70	8,00	0,00	0,00
1_9525	8594033	247081,6	321,80	0,11	0,00	0,00	495,00	245,00	7,79	0,00	0,00
1_5119	8609678	270390,2	447,20	0,18	25,60	0,60	688,00	348,00	7,46	0,00	0,00
1_10044	8610915	262571,4	519,40	0,56	29,30	3,10	799,00	393,00	7,30	0,00	0,00
1_9019	8531585	274807,3	380,90	0,06	18,60	0,70	586,00	306,00	7,44	0,00	0,00
2_3902	8526529	278142,8	521,30	0,08	62,10	0,40	802,00	409,00	7,24	0,00	0,00
1_8871	8578496	275960,7	356,90	0,07	18,40	0,10	549,00	281,00	7,60	0,00	0,00
1_8825	8557272	279507,4	4791,80	14,80	450,00	10,80	7372,00	2909,00	7,00	0,00	0,00
1_1232	8641268	277182,2	519,40	0,17	9,55	1,10	799,00	393,00	7,90	0,00	0,00
1_9145	8586290	264910,6	689,70	0,91	43,30	2,10	1061,00	547,00	8,09	0,00	0,00
1_9565	8577516	282727,1	1744,00	4,64	138,00	0,00	2683,00	1092,00	7,35	0,00	0,00
1_9578	8586753	260764,2	302,90	0,13	14,70	0,10	466,00	248,00	8,30	0,00	0,00
1_938	8591352	269723,6	1228,50	0,84	175,00	0,00	1890,00	780,00	7,85	0,00	0,00
1_1047	8654477	284400	650,00	0,08	90,00	1,20	1000,00	268,00	7,40	0,00	0,00
2_3323	8660301	282358,5	11108,50	38,77	188,00	0,70	17090,00	836,00	7,80	0,00	0,00
2_895	8645642	270437,6	613,00	0,21	119,00	0,00	943,00	390,00	7,99	0,00	0,00
1_9344	8648205	277552,8	479,70	0,35	26,00	1,50	738,00	342,00	7,95	0,00	0,00

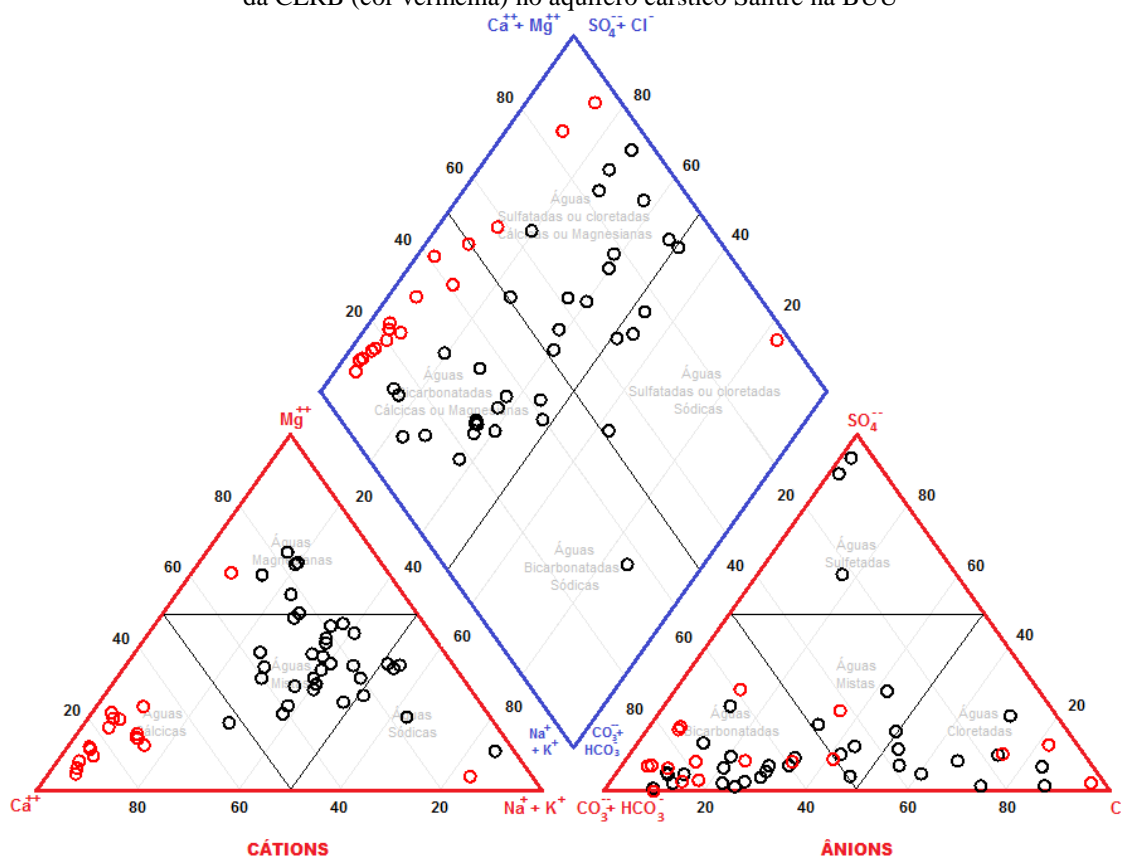
*recipiente para análise hidroquímica quedrou

Fonte: Elaboração própria.

Os dados de elementos maiores das águas do aquífero Salitre da BUU (Tabela 5.1.1) foram plotados no diagrama de Piper (PIPER, 1944), Figura 5.1.2. A maioria das águas foi classificada, de acordo com ânion dominante, como Bicarbonatadas (Cálcica, Mista, Magnésiana e Sódica), classificação características do ambiente cárstico. Abrangendo 30 das amostras de águas dos poços analisadas, representando 58% das águas amostradas na BUU. De acordo com os fácies hidroquímicos obteve-se a seguinte classificação, verificada na Tabela 5.1.2.

(i) Bicarbonatadas Cálcicas, abrange dados de 12 amostras analisadas e representa 23% das águas Bicarbonatadas (ii) Bicarbonatadas Mistas abrange dados de 11 amostras analisadas e representa 21% das águas Bicarbonatadas (iii) Bicarbonatadas Magnésianas abrange dados de 06 amostras analisadas e representa 12% das águas Bicarbonatadas (iv) Bicarbonatada Sódica abrange dados de 01 amostra analisada e representa 2% das águas Bicarbonatadas.

Figura 5.1.2 - Diagrama de Piper, exibindo a classificação das águas dos poços amostrados (cor preta) e dados da CERB (cor vermelha) no aquífero cárstico Salitre na BUU



Fonte: Elaboração própria.

Foram identificadas, também considerando o ânion dominante, as águas Cloretadas, Mistas e Sulfatadas, além da classificação de acordo com o fácies hidroquímico representativo, que serão apresentadas seguidamente.

Águas Cloretadas (Mista, Sódica, Cálcica e Magnésiana) em 12 amostras de águas de poços representando 23% das amostradas na BUU.

(i) Cloretadas Mistas abrange dados de 06 amostras analisadas e representa 12% das águas Cloretadas, (ii) Cloretadas Sódicas abrange dados de 03 amostras analisadas e representa 5% das águas Cloretadas (iii) Cloretadas Cálcicas abrange dados de 02 amostras analisadas e representa 4% das águas Cloretadas, (iv) Cloretada Magnésiana abrange dados de 01 amostra dada analisada e representa 2% das águas Cloretadas.

Águas Mistas (Sódica, Mista, Magnésiana e Cálcica) em 7 amostras de águas de poços representando 13% das águas amostradas na BUU.

(i) Mistas Sódicas abrange dados de 03 amostras analisadas e representa 5% das águas Mistas, (ii) Mista Mistas abrange dados de 02 amostras analisadas e representa 4% das águas Mistas (iii) Mista Magnésiana abrange dados de 01 amostra analisada e representa 2% das águas Mistas, (iv) Mista Cálcica abrange dados de 01 amostra analisada e abrange 2% das águas Mistas.

Águas Sulfatadas (Mistas e Cálcicas) em 3 amostras de águas de poços representando 6% das águas amostradas na BUU.

(i) Sulfatadas Mistas abrange dados de 02 amostras analisadas e representa 4% das águas Sulfatadas, (ii) Sulfatada Cálcica abrange dados de 01 amostra analisada e representa 2% das águas Sulfatadas.

Tabela 5.1.2 - Fácies hidroquímicas e potabilidade das águas

Amostra	Lat	Long	Salinidade (CONAMA 357/2005)	Fácies Hidroquímicas	Ânion Dominante
AG001	8510833	292938	Água Salobra	Cloretada sódica	Cloretada
PA01	8512063	288208	Água Salgada	Cloretada mista	Cloretada
PA04	8525782	290737	Água Salobra	Mista magnésiana	Mista
PA05	8541576	287612	Água Salgada	Cloretada mista	Cloretada
PA06	8543015	276066	Água Salobra	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA07	8555166	271302	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA08	8548965	280109	Água Salobra	Mista mista	Mista
PA10	8570096	274473	Água Salobra	Cloretada sódica	Cloretada
PA11	8562290	273243	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA12	8586027	266623	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA13	8583069	266298	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA14	8576956	268961	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA15	8580462	275385	Água Salgada	Cloretada sódica	Cloretada
PA16	8578396	276424	Água Salobra	Cloretada mista	Cloretada
PA17	8584320	278961	Água Salobra	Cloretada mista	Cloretada
PA18	8585291	274661	Água Salobra	Cloretada mista	Cloretada
PA19	8599343	264346	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA20	8593223	255280	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA21	8596606	268059	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA22	8608934	284107	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA23	8606289	275221	Água Salobra	Mista sódica	Mista
PA24	8611296	273000	Água Salobra	Cloretada mista	Cloretada
PA25	8611756	269197	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA26	8621365	284854	Água Salobra	Mista sódica	Mista
PA27	8640250	271479	Água Salobra	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA28	8630725	282667	Água Doce	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada
PA29	8623083	280466	Água Salgada	Sulfatada mista	Sulfatada
PA30	8622799	281504	Água Salobra	Cloretada magnésiana	Cloretada
PA31	8629014	266855	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA32	8660303	269743	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA33	8672023	276302	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA34	8671556	276235	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA35	8665813	278162	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA36	8664848	276276	Água Doce	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
PA37	8625978	264477	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA38	8628458	266433	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
PA39	8661141	276536	Água Salobra	Mista mista	Mista
PA40	8653817	279411	Água Salobra	Sulfatada mista	Sulfatada
PA41	8648374	284551	Água Salgada	Sulfatada cálcica	Sulfatada
PA42	8643647	284256	Água Salobra	Mista sódica	Mista
PA43	8653817	279411	Água Doce	Bicarbonatada mista	Bicarbonatada
1_5065	8599397	257614	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_9525	8594033	247082	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_5119	8609678	270390	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_10044	8610915	262571	Água Salobra	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada

Amostra	Lat	Long	Salinidade (CONAMA 357/2005)	Facies Hidroquímicas	Ânion Dominante
1_9019	8531585	274807	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
2_3902	8526529	278143	Água Salobra	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_8871	8578496	275961	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_8825	8557272	279507	Água Salgada	Cloretada cálcica	Cloretada
1_1232	8641268	277182	Água Salobra	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_9145	8586290	264911	Água Salobra	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_9565	8577516	282727	Água Salgada	Cloretada cálcica	Cloretada
1_9578	8586753	260764	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_938	8591352	269724	Água Salobra	Mista cálcica	Mista
1_1047	8654477	284400	Água Salobra	Bicarbonatada magnésiana	Bicarbonatada
2_3323	8660301	282358	Água Salgada	Cloretada sódica	Cloretada
2_895	8645642	270438	Água Salobra	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada
1_9344	8648205	277553	Água Doce	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada

Fonte: Elaboração própria

5.1.2 Salinidade das águas subterrâneas

Os dados de salinidade das águas dos 52 poços, consideraram os valores de Sólidos Totais Dissolvidos – STD, que enquadram as águas como doces, salobras e salgadas (Figura 5.1.3) a partir do programa *Qualigraf* e tiveram como base a Resolução CONAMA 357/2005 (Tabela 5.1.2) para corpos hídricos superficiais, visto que para água subterrânea não há legislação que enquadre as mesmas em categorias mais restritivas com base na salinidade (STD), apenas em categorias mais amplas.

Para os dados de salinidade por STD foram encontrados valores variando de 168,00mg/L (PA38) e 2960 mg/L (PA02), nas águas amostradas nos poços da campanha desse estudo.

Na Tabela 5.1.3 podem ser observados os padrões de referências utilizados para comparar as águas amostradas no aquífero cárstico Salitre na BUU.

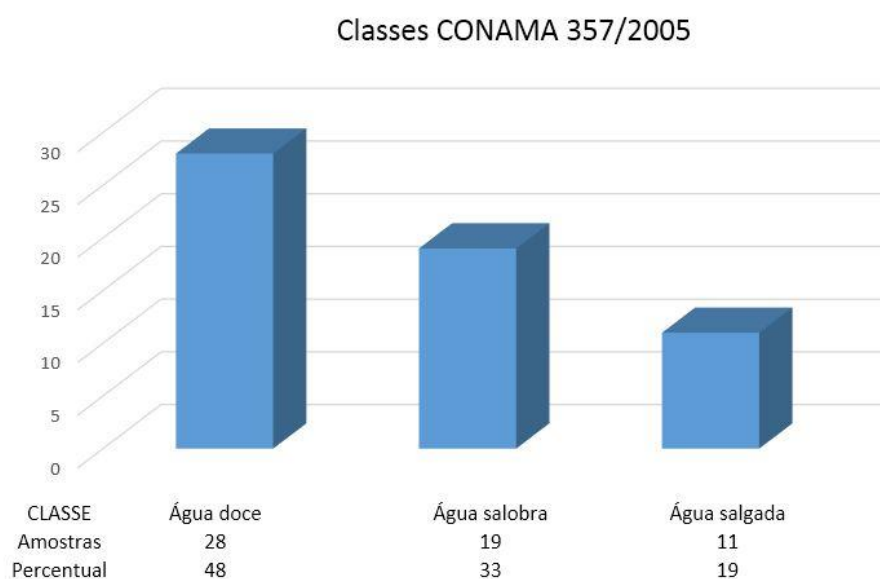
Quando comparados com Resolução CONAMA 357/2005, verifica-se que as águas doces abrangem o percentual de 48% das águas amostradas, seguidas das águas salobras com 33% e logo após as águas salgadas com 19% das amostras analisadas.

Em se tratando da Resolução CONAMA 396/2008, onde as águas são classificadas de acordo com o uso, desde preponderante ou concomitante, com valor máximo permitido - VMP de 1000 mg/L, as águas analisadas e enquadradas na Classe 1, que estão contidas no uso concomitante, abrangeram um percentual de 81% das amostras, enquanto que as águas enquadradas nas Classes 2, 3 e 4, também contidas no uso concomitante, abrangeram um

percentual 19%, com VMP acima de 1000 mg/L.

Para a *World Health Organization – Drinking Water Recommendation* (WHO, 2003) as águas amostradas foram classificadas para o uso humano considerando um parâmetro organoléptico, no caso o paladar. Assim as águas da BUU foram classificadas como excelente 16%, boa 43%, razoável 21%, ruim 5% e por fim 16% das amostras foram consideradas como inaceitáveis.

Figura 5.1.3 - Gráfico de dados de STD exibindo a classificação das águas nos pontos amostrados na BUU de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.1.3 - Classificação da salinidade das águas na BUU, de acordo com os padrões de referências.

WHO, 2003	Excelente	Boa	Razoável	Ruim	Inaceitável
Amostras	9	25	12	3	9
Percentual	15,5%	43%	21%	5%	15,5%
CONAMA 357/2005	Água doce	Água salobra	Água salgada		
Amostras	28	19	11		
Percentual	48 %	33%	19%		
CONAMA 396/2008	Classe 1	Classe 2, 3 ou 4			
Amostras	47	11			
Percentual	81%	19%			

Fonte: Elaboração própria.

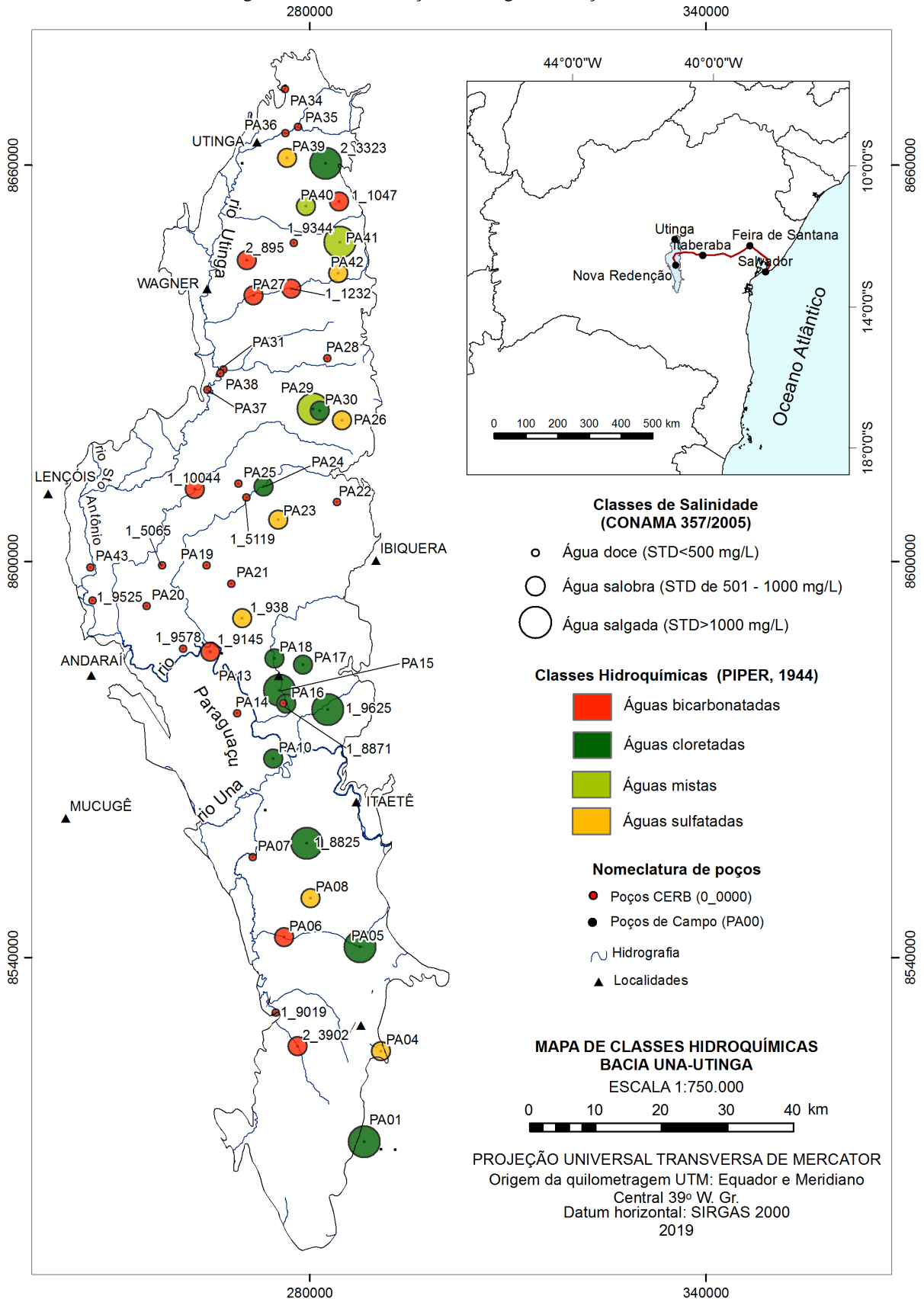
5.1.3 Análise espacial dos parâmetros hidroquímicos

A análise conjunta dos fácies hidroquímicos (PIPER, 1994) no aquífero cárstico Salitre da BUU e da salinidade (CONAMA 357/2005) quando espacializada (Figura 5.1.4) mostra que o aumento da salinidade está associado possivelmente a uma mudança dos fácies hidroquímicas, bem como ao processo de evaporação.

As águas Cloretadas e seus subgrupos foram majoritariamente observada na porção leste da área e se enquadram predominantemente como salgadas e salobras. Enquanto as águas Bicarbonatadas e seus subgrupos tendem a ocorrer à oeste, prevalecendo as águas doces seguidas das salobras.

A espacialização da classificação das águas, a partir da CONAMA 357/2005 e dos fácies hidroquímicos (Figura 5.1.4), mostra o aumento dos valores de STD e a mudança dos fácies hidroquímicos. Na porção leste as águas tendem a apresentar-se mais Cloretadas (Mista, Sódica, Cálcica e Magnesiana) e mais salobras e salgadas. E enquanto que, na porção oeste apresentam-se com tendência a mais Bicarbonatadas (Mistas, Magnesianas e Sódica) e mais doces e pouco salobras, possivelmente diante da recarga do aquífero favorecida pela barreira orográfica cusada pela serra do Sincorá, contribuindo com maiores precipitações naquela região, ocasionando menor tempo de residências das águas no aquífero.

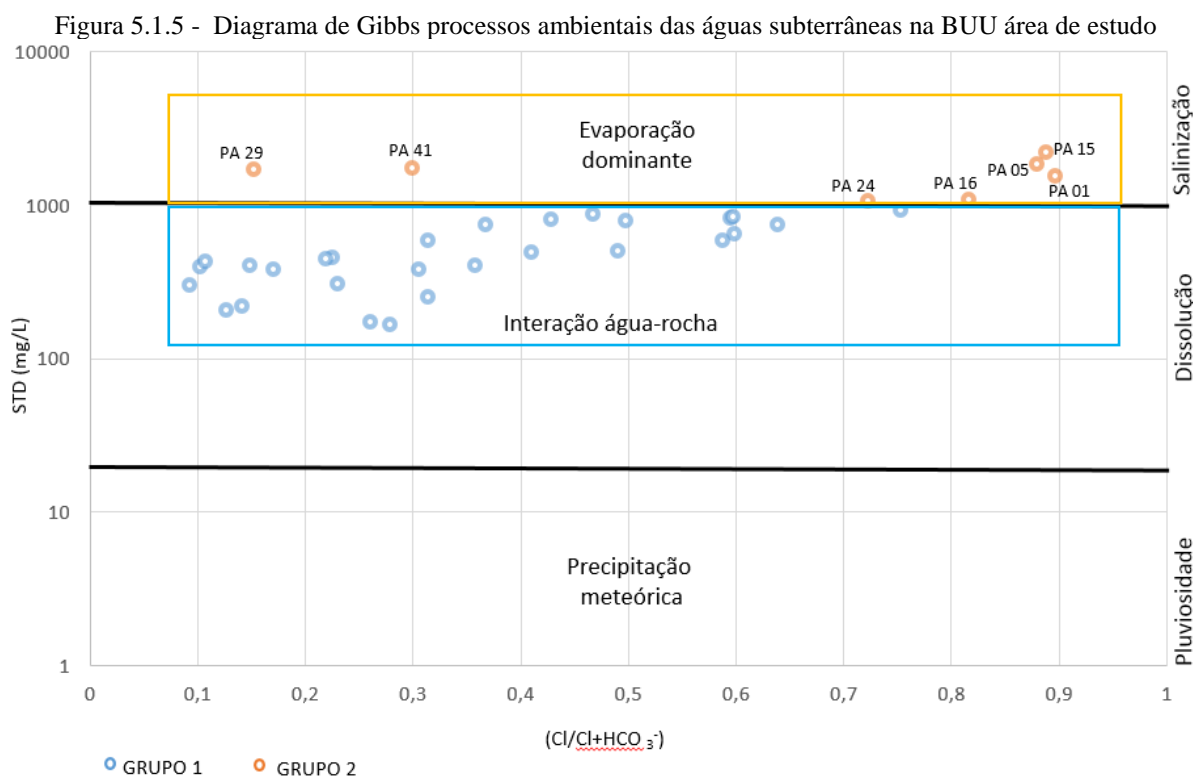
Figura 5.1.4 - Distribuição faciológica e relação do STD



Fonte: Elaboração própria.

Buscando identificar os mecanismos naturais que tenham interferido na química das águas subterrâneas (campanha de campo) na BUU, aplicou-se o diagrama de Gibbs (GIBBS,1970), que considera a relação dos sólidos totais dissolvidos (STD) com a razão $Cl/Cl+HCO_3^-$, podendo identificar os processos ambientais relacionados a influência da precipitação meteórica (pluviosidade), interação água-rocha (dissolução) e evaporação (salinização) das águas (REDWAN, MONEIM E AMRA, 2016), no aquífero cárstico Salitre.

No diagrama de Gibbs (Figura 5.1.5), observa-se dois grupos pré-estabelecidos. O Grupo 1 (retângulo azul) mostra uma prevalência do processo de interação água-rocha, onde está associado a dissolução, abrange a grande maioria das amostras (80%) que englobam a faixa de STD entre 168 a 1000 mg/L. Enquanto que no Grupo 2 (retângulo laranja) verifica-se que o processo de evaporação se faz presente, onde está associada a salinização, abrange a minoria das amostras (20%) que engloba a faixa de STD entre 1001 e 2220 mg/L (PA 01, 05, 15, 16, 24,29,41, estes poços encontram-se na porção leste na BUU e suas águas são classificadas como Cloretadas). Assim, de acordo com Redwan, Moneim e Amra (2016), nas regiões áridas e semiáridas, quando a evaporação ocorre superior a pluviosidade, acarreta o processo de salinização e aumento de STD.



Fonte: Elaboração própria.

5.2 ANÁLISES ISOTÓPICAS

Na área de estudo foram analisadas as assinaturas isotópicas de 40 amostras de águas subterrâneas (Tabela 5.2.1), utilizando isótopos de hidrogênio ($\delta^2\text{H}$), oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Carbono (^{13}C). Esta amostragem foi realizada entre os dias 13 e 22 de setembro de 2015, em um período seco.

Os resultados isotópicos para o oxigênio e o hidrogênio apresentam padrão isotópico equivalente (Figura 5.2.1).

Os pontos amostrados PA04 (poço), PA32 (poço) e AG001 (água superficial) apresentam, respectivamente, razão isotópica de oxigênio de 2,85‰, 4,63‰ e 13,67‰. Estas amostras foram os pontos com razão isotópica mais positiva, sugerindo águas mais evaporadas.

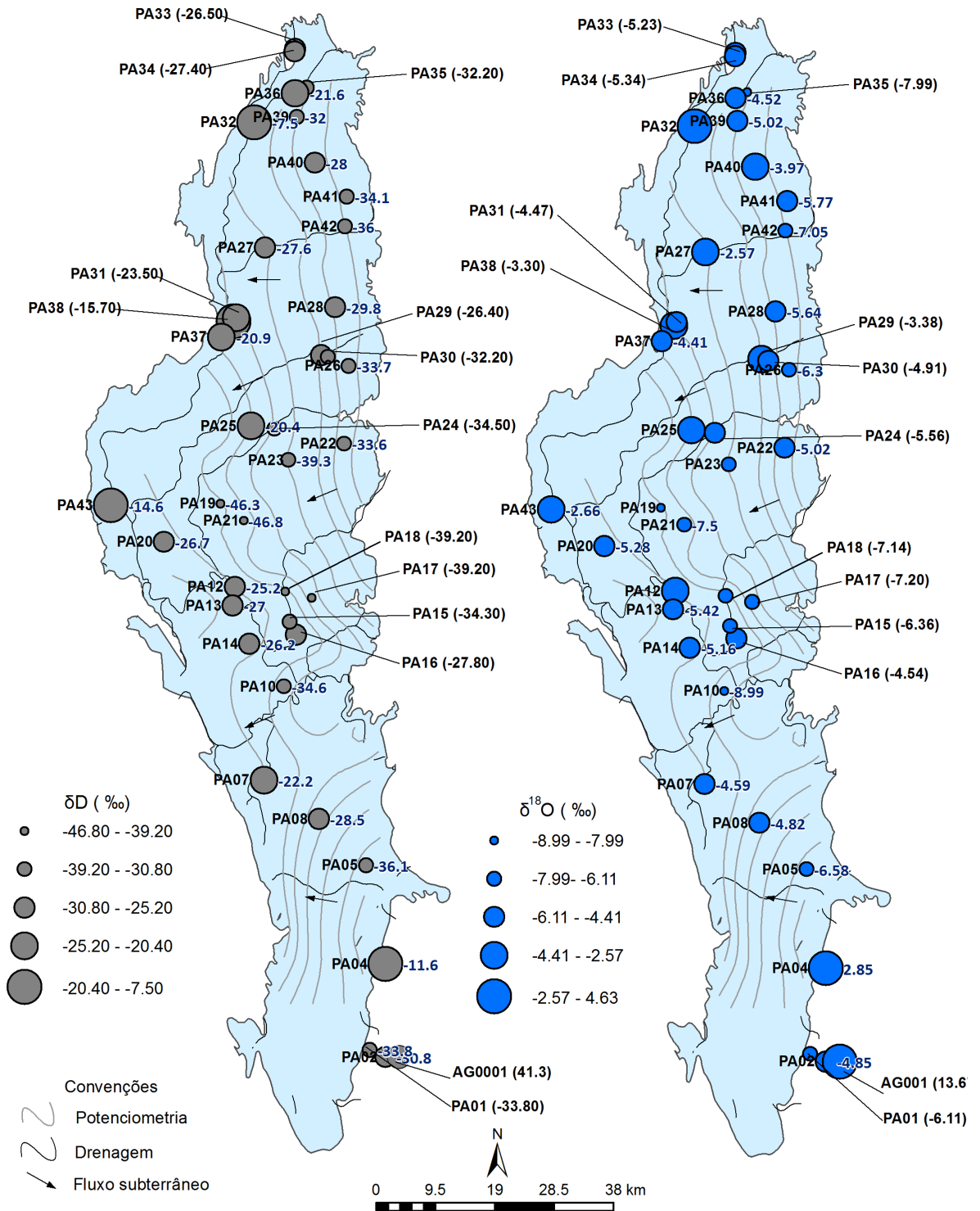
Tabela 5.2.1 - Dados isotópicos

Amostra	Lat	Long	$\delta^{18}\text{O}$(‰)	δDH (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	SDTmg/L
AG001	8510833	292938	13,67	41,3	-12,03	618
PA01	8512063	288208	-6,11	-33,8	-15,27	1550
PA02	8510893	290737	-4,85	-30,8	-14,88	2960
PA04	8525782	290737	2,85	-11,6	-13,08	504
PA05	8541576	287612	-6,58	-36,1	-13,99	1850
PA07	8555166	271302	-4,59	-22,2	-12,37	253
PA08	8548965	280109	-4,82	-28,5	-12,21	797
PA10	8570096	274473	-8,99	-34,6	-12,7	931
PA12	8586027	266623	-3,98	-25,2	-12	333
PA13	8583069	266298	-5,42	-27	-11,67	323
PA14	8576956	268961	-5,16	-26,2	-12,81	401
PA15	8580462	275385	-6,36	-34,3	-13,41	2220
PA16	8578396	276424	-4,54	-27,8	-11,75	1090
PA17	8584320	278961	-7,2	-39,2	-12,31	757
PA18	8585291	274661	-7,14	-39,2	-9,78	830
PA19	8599343	264346	-8,28	-46,3	-13,07	456
PA20	8593223	255280	-5,28	-26,7	-9,25	300
PA21	8596606	268059	-7,5	-46,8	-13,46	430
PA22	8608934	284107	-5,02	-33,6	-12,21	448
PA23	8606289	275221	-7,29	39,3	-10,57	597
PA24	8611296	273000	-5,56	-34,5	-12,56	1060
PA25	8611756	269197	-3,82	-20,4	-12,37	407
Amostra	Lat	Long	$\delta^{18}\text{O}$(‰)	δDH (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	SDTmg/L
PA26	8621365	284854	-6,3	-33,7	-12,55	496
PA27	8640250	271479	-2,57	-27,6	-12,43	598

PA28	8630725	282667	-5,64	-29,8	-11,91	387
PA29	8623083	280466	-3,38	-26,4	-11,74	1720
PA30	8622799	281504	-4,91	-32,2	-9,88	848
PA31	8629014	266855	-4,47	-23,5	-12,38	383
PA32	8660303	269743	4,63	-7,5	-12,52	255
PA33	8672023	276302	-5,23	-26,5	-8,93	254
PA34	8671556	276235	-5,34	-27,4	-9,67	176
PA35	8665813	278162	-7,99	-32,2	-11,91	222
PA36	8664848	276276	-4,52	-21,6	-10,84	207
PA37	8625978	264477	-4,41	-20,9	-12,48	310
PA38	8628458	266433	-3,3	-15,7	-13,88	168
PA39	8661141	276536	-5,02	-32	-13,15	873
PA40	8653817	279411	-3,97	-28	-7,49	820
PA41	8648374	284551	-5,77	-34,1	-10,14	1750
PA42	8643647	284256	-7,05	-36	-12,44	648
PA43	8653817	279411	-2,66	-14,6	-10,82	406

Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.2.1 - Distribuição dos isótopos de oxigênio e hidrogênio no aquífero Salitre na BUU.



Fonte: Elaboração própria.

As atividades de campo sugerem que o PA04, por se tratar de um ponto que se encontra na borda da porção sul do platô carbonático e em contato com outras litologias, pode ter ocorrido a mistura de águas de outras fontes e o fluxo ter percorrido através das fraturas na

rocha carbonática, ocorrendo evaporação interna. Pode também ter ocorrido evaporação antes da infiltração. Essas situações podem indicar o fato da razão isotópica nesse ponto ser mais evaporada. Já o PA32, possivelmente está associado à proximidade com rio Utinga – sugerindo interação de águas superficiais (causada/influenciada pelo bombeamento) com o aquífero nesse ponto.

O ponto AG001 trata-se de água superficial, sendo esperado um valor mais evaporado.

Numa análise regional, os isótopos de oxigênio e de hidrogênio exibem tendência de águas mais evaporadas na porção oeste do aquífero, enquanto que na porção leste são observadas águas com uma assinatura isotópica mais depletadas (negativa). Não obstante, muito embora seja singela essa variação, pode indicar que na porção oeste ocorra maior evaporação na zona vadosa. O mapeamento geológico da CPRM (2005), indica que na porção oeste da área de estudo ocorrem coberturas cenozoicas bem desenvolvidas, sendo estas possivelmente, o fator condicionante para haver uma maior evaporação na zona vadosa nessa porção da área.

Quando comparados os valores dos isótopos de oxigênio e de hidrogênio de todas as amostras na área de estudo com a água de chuva, plotados sobre a linha meteórica global – LMG (Figura 5.2.2) é observado uma grande variância amostral. Grande parte das amostras encontram-se sobrepostas, ou muito próximas, da LMG, todavia, as amostras AG001 (águas superficiais) e PA32 e PA04 (águas subterrâneas) apresentaram resultados mais enriquecidos em $\delta^{18}\text{O}$, respectivamente 13,67‰, 4,63‰ e 2,85‰. Sendo assim, essas amostras são interpretadas como água que sofreram forte processo de evaporação, seja ele oriundo de uma evaporação na zona vadosa do aquífero, seja pela evaporação de águas superficiais (e.g. ciclo hidrológico).

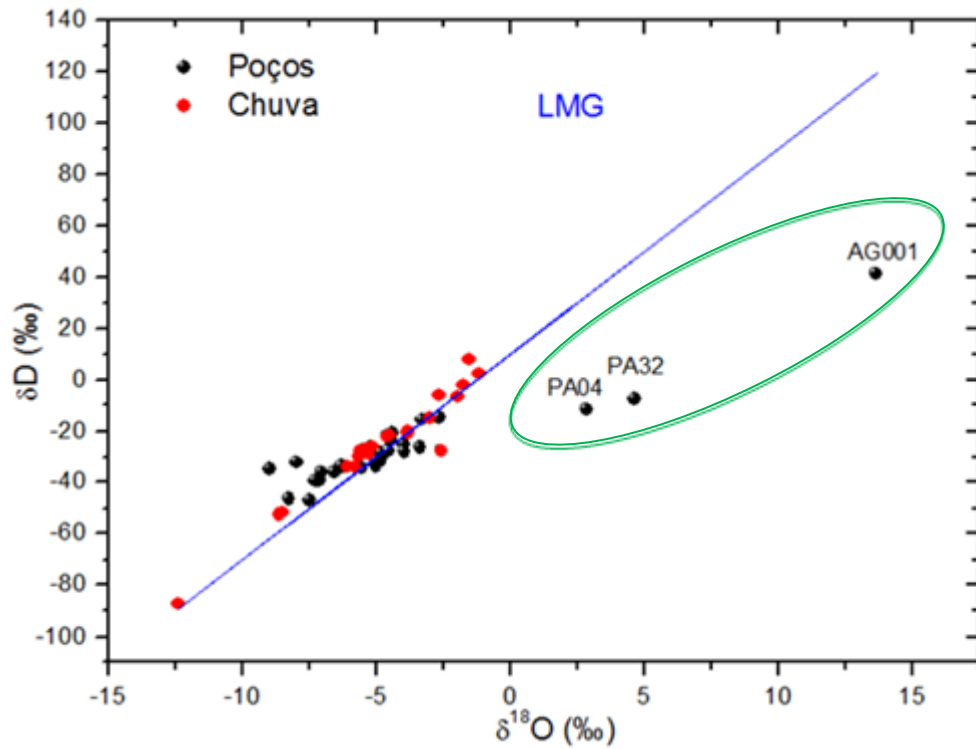
Pode ser verificado que, de modo geral, as assinaturas isotópicas das amostras de água subterrânea assemelham-se às de água de chuva, sugerindo uma rápida infiltração das águas superficiais /precipitação no aquífero.

A Figura 5.2.3 apresenta diagrama cartesiano dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD), eixo y, em função do $\delta^{18}\text{O}$, eixo x. Onde se verificam 3 classes.

A classe 1, na porção esquerda do gráfico, abrange poços com águas mais evaporadas, onde o $\delta^{18}\text{O}$ é mais enriquecido, o STD varia de 255 a 618mg/L, com mediana de 618 mg/L. A classe 2, na porção central, abrange a maioria dos pontos amostrados, onde os valores do $\delta^{18}\text{O}$ são todos negativos, variando entre si, entre águas mais ou menos evaporadas sem muita diferenciação, muito embora haja variação nos valores o STD que varia entre 300 e

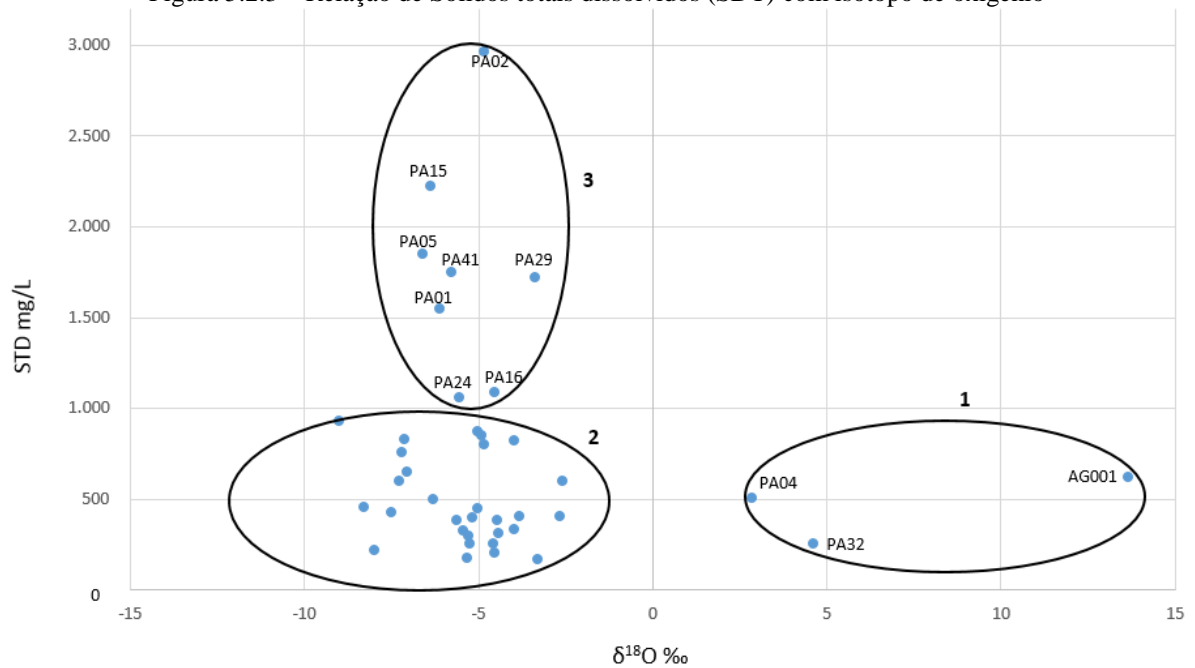
931mg/L.

Figura 5.2.2 - Comportamento das águas amostradas e de água de chuva na BUU, com a Linha Meteórica Global – LMG.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.2.3 – Relação de Sólidos totais dissolvidos (STD) com isótopo de oxigênio



Fonte: Elaboração própria.

A classe 3, na porção superior do gráfico, é representada pelos poços PA01, 02, 05

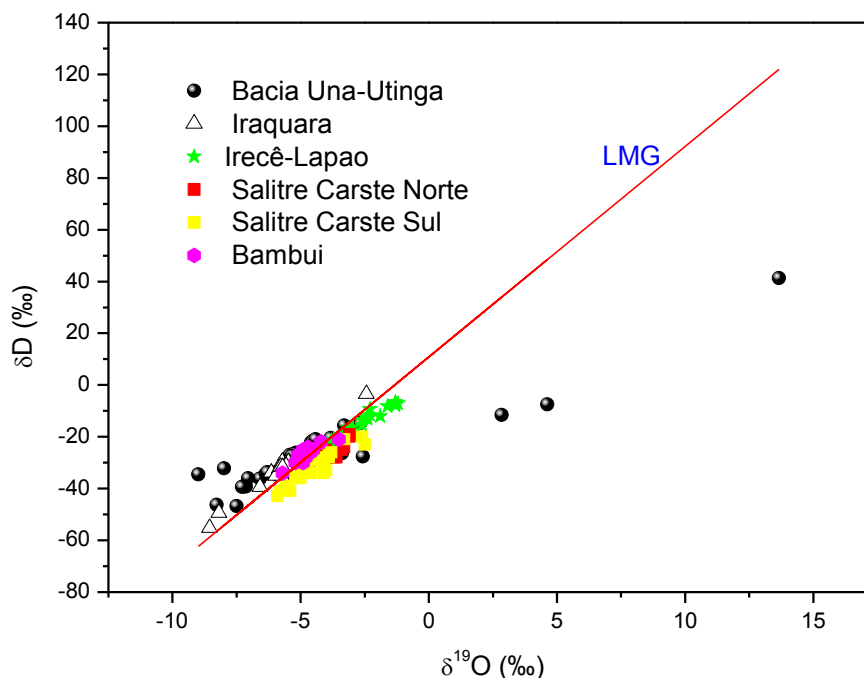
15, 16, 29 e 41, apresenta águas mais salinas onde o STD varia 1060 a 2960 (PA02) mg/L, que estão localizados na porção leste da BUU (Figura 5.2.1) podendo ser associados a interação água/rocha e não a evaporação, possivelmente devido a uma rápida infiltração. Pode ser observado que esses poços se apresentam no diagrama de Gibbs com águas em que o processo de evaporação se fez presente, estando associadas com a salinização, e foram classificadas como águas Cloretadas.

A figura 5.5.4 mostra o a correlação comparativa dos dados de amostras de água de poços de estudos realizados no aquífero cárstico Salitre, na bacia de Irecê, bem como no aquífero Bambuí (porção oeste), ambos na Bahia. Foram realizados estudos por: Salles (2017), na bacia de Irecê e na, porção meridional desta; Nossa (2011), nos municípios de Irecê e Lapão; Santos (2008) na bacia do rio Salitre, porção Norte e Sul; e Camarugy (2009), no oeste da Bahia, aquífero Bambuí, além dos dados das amostras de águas no aquífero Salitre na BUU. Verifica-se semelhança do padrão isotópico entre as águas dos estudos no aquífero cárstico Salitre, inclusive entre as águas do aquífero Bambuí.

No entanto, averigua-se que há amostras de águas mais evaporadas no aquífero cárstico Salitre na BUU. As amostras AG001 e PA32, representantes das águas superficiais, apresentam padrão isotópico de águas mais evaporadas, característicos dessas águas. A amostra de água PA04 apresenta-se mais evaporada, possivelmente por interação entre águas superficiais e águas subterrâneas, diante da proximidade de áreas de limites de contatos geológicos sugerindo que essa interação ocorra através das zonas de fraquezas desses contatos ou através de porosidades secundárias. As essas águas do aquífero Salitre da BUU conferem um caráter de águas mais evaporadas, dirente do padrão das águas dos outros estudos comparados.

Assim, generalizando, os padrões isotópicos resultantes dos estudos anteriores, apresentados na Figura 5.5.4, somados aos apresentados nesta tese, sugerem, para a maioria dos pontos em análises, que a recarga destes aquíferos ocorrem associadas a eventos de precipitação semelhantes.

Figura 5.5.4 – Correlação e comparação de dados de estudos nos aquíferos Salitre e Bambuí na Bahia



Fonte: Elaboração própria.

5.3 CAPACIDADE ESPECÍFICA E TRANSMISSIVIDADE NA BUU

O aquífero cárstico Salitre na BUU foi avaliado quanto a sua potencialidade considerando os parâmetros hidrodinâmicos capacidade específica e transmissividade.

Foram utilizados dados de ensaios de bombeamento de 94 poços tubulares, a partir dos quais foram gerados dados de capacidade específica – Sc e transmissividade – T . Desses 94 poços, 35 poços apresentaram ensaio de bombeamento apropriado para análise a partir do método da recuperação de Theis (1935), de rebaixamento para T e Sc , respectivamente.

5.3.1 Interpretação dos dados analíticos

A avaliação univariada dos dados da T e Sc mostrou assimetria positiva, caracterizada pela diferença entre os valores das médias e medianas para cada parâmetro. Esses parâmetros apresentam-se predominantes no intervalo entre 0,233 (m^2/dia) a 2,206 (m^2/dia) para T , e 0,374 (m^2/dia) a 3,175 (m^2/dia) para Sc (Tabela 5.3.1). Muito embora ocorra significativa discrepância mostrada pelos altos valores máximos de 139 (m^2/dia) e 34 (m^2/dia),

para T e Sc respectivamente.

Isso se reflete nos valores do coeficiente de variação – CV para os dois parâmetros, de 4,191 para T e 1,984 para Sc. As diferenças entre os valores de CV para os dois parâmetros estão próximas do dobro, evidenciando que o método da recuperação de Theis (1935), gera mais anisotropia quando confrontado com as medidas de Sc geradas pelo método do rebaixamento.

Tabela 5.3.1 - Sumário descritivo dos valores de T e Sc usados na elaboração do modelo empírico.

	T (m²/dia)	Sc (m²/dia)
Número de dados	35	35
Mínimo	0,060	0,031
Máximo	139,647	34,778
Média	5,610	3,260
Mediana	0,621	0,753
Quartil superior	0,233	0,374
Quartil inferior	2,206	3,175
Desvio padrão	23,509	6,467
Coefficiente de variação	4,191	1,984

Fonte: elaboração própria.

5.3.2 Análise empírica

Diante dos resultados foi necessária a correção dos valores de T e Sc usados para a elaboração do modelo empírico, a partir da transformada logarítmica (Figura 5.3.1), visto que as elevadas assimetrias não resultariam em valores paramétricos representativos para o uso do modelo de regressão linear-MRL.

A partir dos valores de T e Sc transformados para forma logaritimizada correlacionou-se estes dados em um MRL o qual é exibido na Figura 5.3.2 e na Equação da reta (Equação 12).

$$\text{Log}(T) = b^0 + b^1 \cdot \text{Log}(Sc)$$

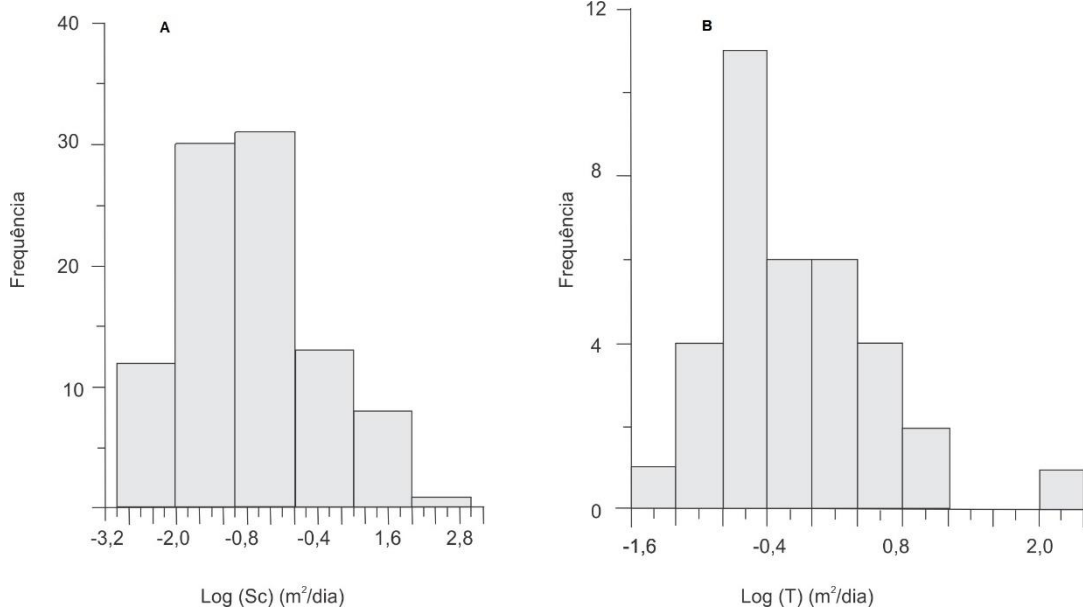
$$\text{Log}(T_{\text{empírica}}) = -0,086 + 0,890 * \text{Log}(Sc) \quad (12)$$

Porém os valores apresentados não manifestam leituras representativas, havendo a necessidade da transformação para termos lineares, considerando a Equação 13, onde b_0 , é o coeficiente linear da reta e b_1 o coeficiente angular da reta. Resultando na $T_{\text{empírica}}$.

$$\text{Log}(T_{\text{analítica}}) = \left(\frac{2.3Q}{4\pi\Delta m} \right) \leftrightarrow \text{Log}(Sc_{\text{analítica}}) = \frac{Q}{S}$$

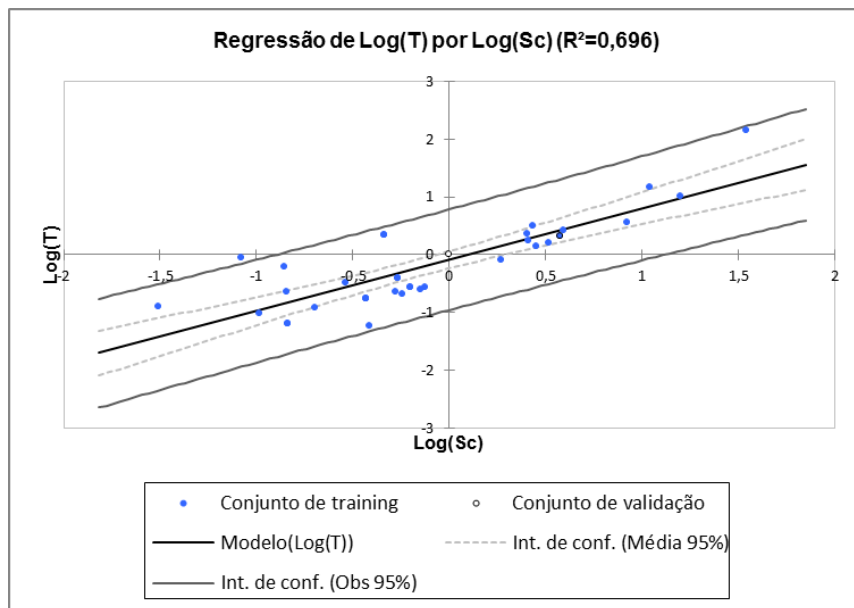
$$T_{\text{empírica}} = 10^{b_0} * Sc^{b_1} \tag{13}$$

Figura 5.3.1 Feição histogramática (A) para os valores logarítmicos (B) de Sc e T, respectivamente.



Fonte: elaboração própria.

Figura 5.3.2 - Modelo de regressão linear entre os valores de Log (T) e Log (Sc).



Fonte: Elaboração própria.

Assim, com os valores de T e Sc, a função para Tempírica do aquífero cárstico

Salitre da BUU é exibido a partir de: **Tempírica = 0,82.Sc^{0,89}**.

A figura 5.3.2, que exhibe a regressão linear, apresenta 69% dos dados de T correlacionáveis com os dados de Sc onde $R^2=0,69$. Considerou-se a correlação aceitável por esse valor estar muito próximo de 70%. A função de **Tempírica = 0,82.Sc^{0,89}** mostrou-se semelhante a apresentada por Fabbri (1997), em estudos realizados em aquíferos cársticos, no noroeste da Itália, cuja a equação é dada **T = 0,85.Sc^{1,07}**, com coeficiente de determinação, $R^2=0,95$.

Comparando com os aquíferos cársticos nos domínios das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré, na região de Irecê a função empírica foi **Tempírica = 0,5.Sc^{1,18}**, enquanto para o aquífero cárstico Salitre na porção sul foi **Tempírica = 0,42.Sc^{1,08}** (GONÇALVES, 2017). E os valores de $R^2=0,844$ e $R^2=0,829$ para o aquífero cárstico Salitre e Salitre sul, respectivamente, verifica-se comparações com aquele apresentado por Fabbri (1997). As discrepâncias nos valores obtidos, com os valores do aquífero cárstico Salitre na BUU, se devem pelas condições de anisotropias e heterogeneidade desses sistemas aquíferos cársticos e pelo número total e representatividade dos dados utilizados.

A Tabela 5.3.2 mostra a estatística descritiva dos 94 poços de Tempírica para o aquífero cárstico Salitre na BUU, com uma média de 40,39(m²/dia) enquanto a mediana foi de 2,027(m²/dia), os quais variam em termos interquartis em intervalo de 0,552(m²/dia) até 13,069(m²/dia).

Tabela 5.3.2 - Sumário descritivo para os dados de T empírico

T_{empírico}	
Número de dados	94
Mínimo	0,037
Máximo	1149,142
Média	40,395
Mediana	2,027
Quartil inferior	0,552
Quartil superior	13,069
Variancia	18564,717
Desvio padrão	136,252
Coefficiente de variação	3,373

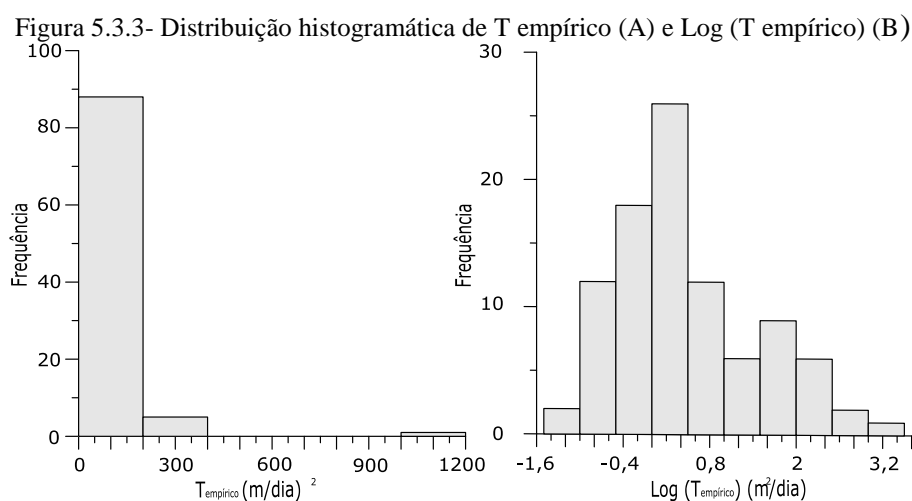
Fonte: elaboração própria.

Nota-se uma elevada diferença entre os valores da média e os representados no intervalo dos quartis inferior ao superior, demonstrando elevada assimetria no padrão univariado dos dados marcados por expressivos *outliers*. A assimetria elevada reflete a alta

heterogeneidade dos valores indicado pelo coeficiente de variação em 3,373.

É verificado que o valor da variância é elevado, o que dificulta a espacialização dos dados por métodos probabilísticos dependentes de variogramas. Utilizou-se, portanto, de testes empíricos para a determinação do patamar mais adequado para modelar o variograma.

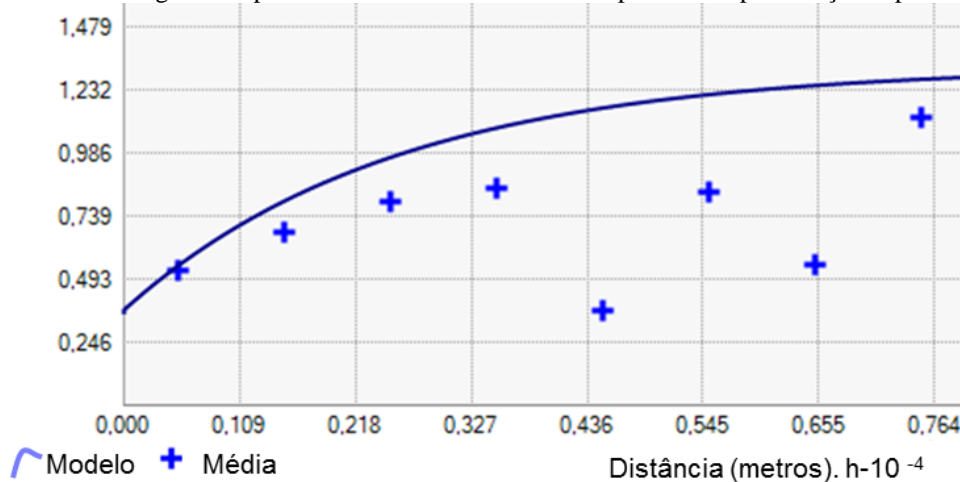
A distribuição assimétrica dos valores de $T_{empírica}$ necessitou a realização de uma transformada logarítmica dos valores a fim de normalizá-los, representados na Figura 5.3.3, que demonstra a diferença na distribuição histogramática entre os dados de $T_{empírica}$ e $\text{Log}(T_{empírica})$.



Fonte: Elaboração própria.

Realizada a conversão dos dados de $T_{empírica}$ e $\text{Log}(T_{empírica})$, obteve-se o variograma do segundo conjunto de dados. A elipse de varredura conexa a variografia mostrou um padrão omnidirecional, porém, o eixo principal da correlação exibiu azimuth N329. Assim, os dados experimentais expuseram um desempenho que melhor se adapta a uma função exponencial, conforme apresentado na Figura 5.3.4. Embora a correlação entre o variograma e a curva experimental não apresente elevada simetria, este modelo mostrou melhor aleatoriedade diante dos resultados apresentados.

Figura 5.3.4 - Variograma experimental associado ao teórico representado pela função exponencial.



Fonte: Elaboração própria.

5.3.3 Modelo geostatístico

Após a modelagem da variografia dos dados de $\text{Log}(T_{\text{empírica}})$ foi realizada a krigagem ordinária – KO a qual é apontada por Fabbri (1997), Razack e Lasm (2007) como melhor método para interpolar dados hidrogeológicos, com a aplicação da Equação 14.

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (14)$$

Após as devidas conversões de $T_{\text{empírica}}$ e $\text{Log}(T_{\text{empírica}})$, e de acordo com a melhor função exponencial variografada, exibiu-se, portanto, o mapa de distribuição de $T_{\text{empírica}}$ na BUU (Figura 5.3.5) e seus domínios e áreas equivalentes apresentados na Tabela 5.3.3 convertidos para forma de números inteiros.

Tabela 5.3.1 - Domínios de $T_{\text{empírica}}$ e suas áreas equivalentes com valores em números inteiros

Domínio	Transmissividade (m ² /dia)	Área (km ²)	Proporção (%)
I	0,03	0,35	32,09
II	0,35	2,24	2.153,80
III	2,24	20,26	1.805,70
IV	20,26	115,45	909,77

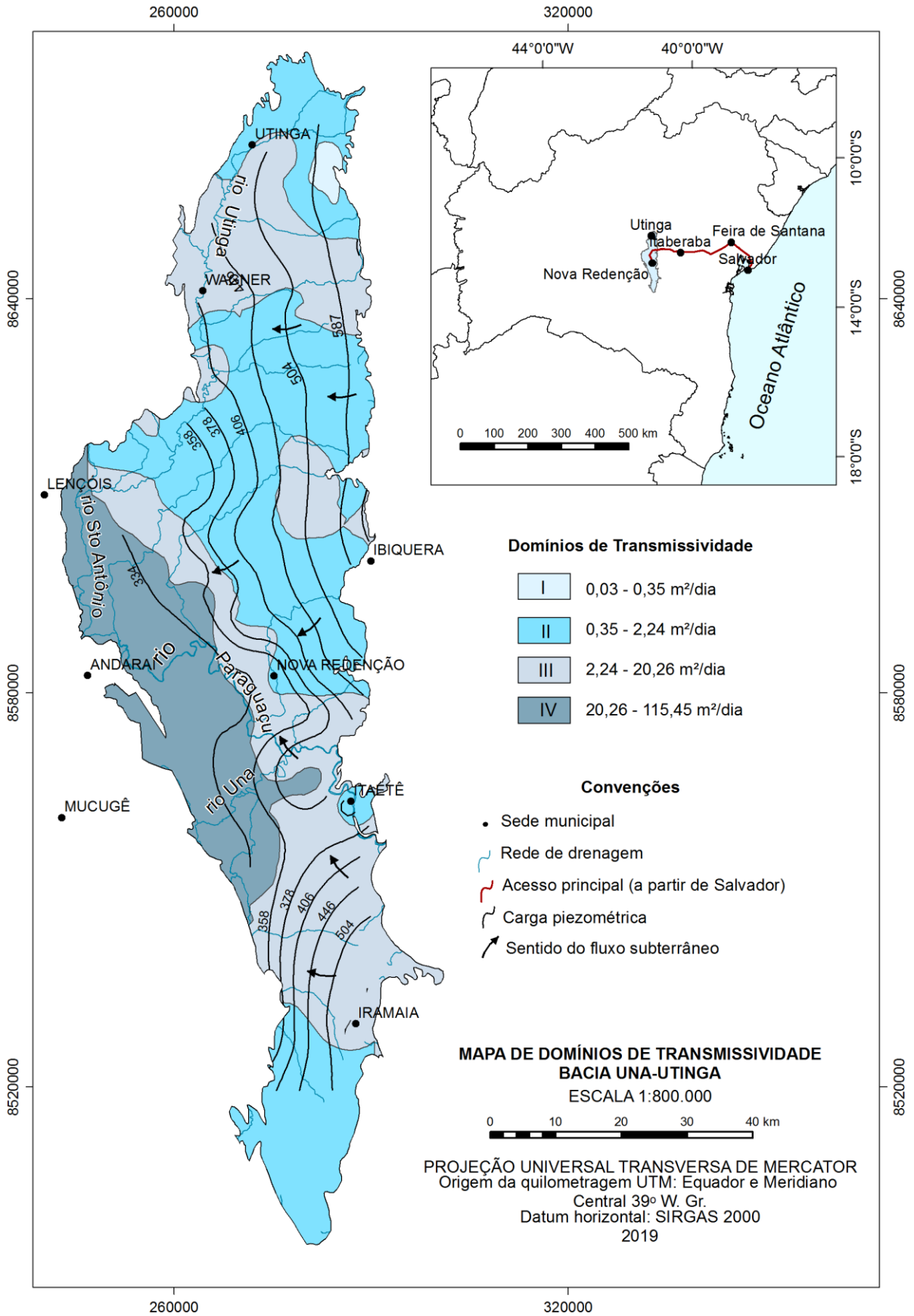
Fonte: Elaboração própria.

Os domínios II e III são os mais abrangentes na área em estudo perfazendo aproximadamente 80% no aquífero cárstico Salitre da BUU, seguido pelo domínio IV com aproximadamente 18%, e o domínio I insignificante. Assim, as áreas com transmissividade predominantes no aquífero cárstico Salitre na BUU estão entre 0,35 (m²/dia) e 20,26 (m²/dia) (Tabela 5.3.1). Como observado no mapa, os domínios de potencialidades estão controlados segundo a direção do fluxo subterrâneo principal, onde, a transmissividade tende a aumentar nas zonas de convergência de fluxo, no sentido oeste.

Em comparação com o aquífero Cárstico Salitre - ACS na região de Irecê, estudado por Gonçalves (2017), os valores de transmissividade (T) apresentados neste trabalho, mostram-se com diferentes graus de predominância sendo verificado no ACS que aproximadamente 66% da área, possuem valores de T variando entre 50 (m²/dia) até 250(m²/dia).

Ao comparar os resultados deste trabalho com os padrões de potencialidades estabelecidos por De Wiest (1965), Şen (1995), Şen (2014), o aquífero Salitre da BUU apresenta uma potencialidade baixa variando de insignificante, a baixa e moderada.

Figura 5.3.5 – Mapa de Distribuição de $T_{empírica}$



Fonte: Elaboração própria

5.4 FEIÇÕES CÁRSTICAS

Esse item trata da apresentação dos resultados obtidos em referência às feições cársticas na BUU, culminando no mapa de índice cárstico.

5.4.1 Feições cársticas identificadas na área de estudo

As informações foram observadas preliminarmente em campo e através de imagens de satélites onde chamou à atenção a presença de feições cársticas superficiais na área, despertando assim a necessidade em utilizar aplicação de metodologias e técnicas referentes à cartografia geomorfológica, no intuito de obter o entendimento da formação e da interação atual dos fatores constituintes do relevo e do ambiente em questão. A interpretação geomorfológica auxiliou no diagnóstico das feições, que subsidiaram a identificação das características geológicas-estruturais, morfológicas e litoestratigráficas de forma regional da área estudada.

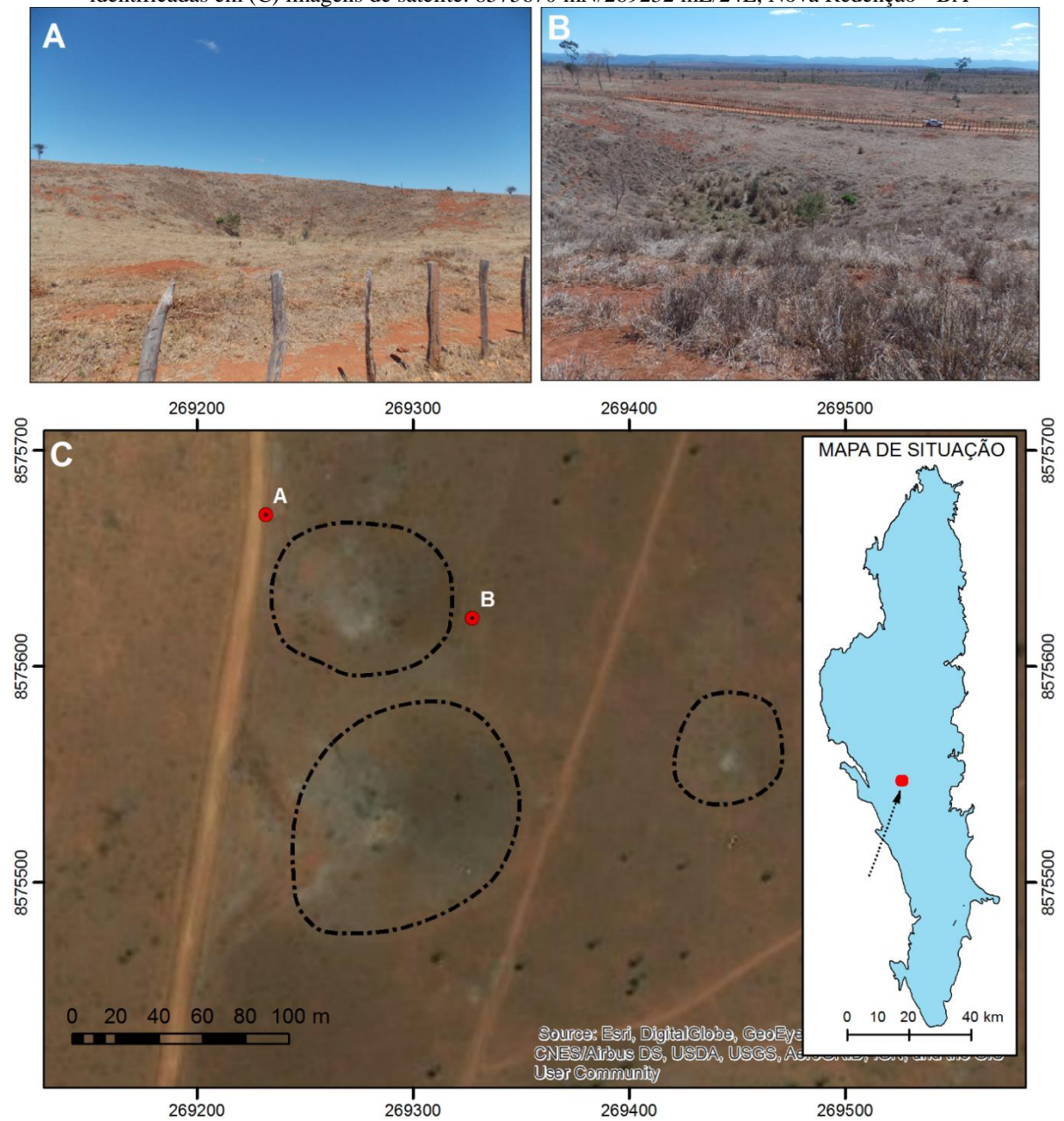
As feições cársticas identificadas em campo, reconhecíveis em imagem de satélite, e aerofotointerpretadas, tanto em modelos sombreados (*hillshade*) quanto nas imagens aéreas, representam as feições negativas, em sua maioria dolinas (Figura 5.4.1) com aproximadamente 100 metros de diâmetro ou maiores. Estas visualmente se apresentam em forma de depressões circulares e alongadas às vezes em grupo, ou alinhadas seguindo direções preferenciais em zonas de fraqueza do substrato. Essas feições são representantes importantes do domínio das feições superficiais do sistema cárstico.

As imagens de satélites utilizadas corroboram com as identificações realizadas em campo, ressaltando a importância em se confrontar os dados de campo com os dados de imageamento. Para tanto, os dados de declividade do terreno, foi classificada de acordo com a classificação do relevo da instrução IBGE (2009) que se mostrou de fundamental importância para o realce, interpretação e identificação das depressões fechadas, especialmente as dolinas mapeadas na área de estudo a exemplo da Figura 5.4.1.

O recorte do mapa de divisão de relevo por classes de declividade (Figura 5.4.2) acentua os declives das depressões fechadas mais expressivas, tornando a aerofotointerpretação mais assertiva, já que as mesmas poderiam, em imagem de satélites, ser confundidas com pivôs e/ou áreas de cercados, devido ao seu aspecto visual. A aplicação e construção desse mapa correlacionado com a imagem de satélite *Landsat* e *Rapideye*, bem como a aplicação do *hillshade*, permitiu a certeza de mapeamento assegurado das feições cársticas.

Figura 5.4.1 - Dolinas reconhecíveis em campo

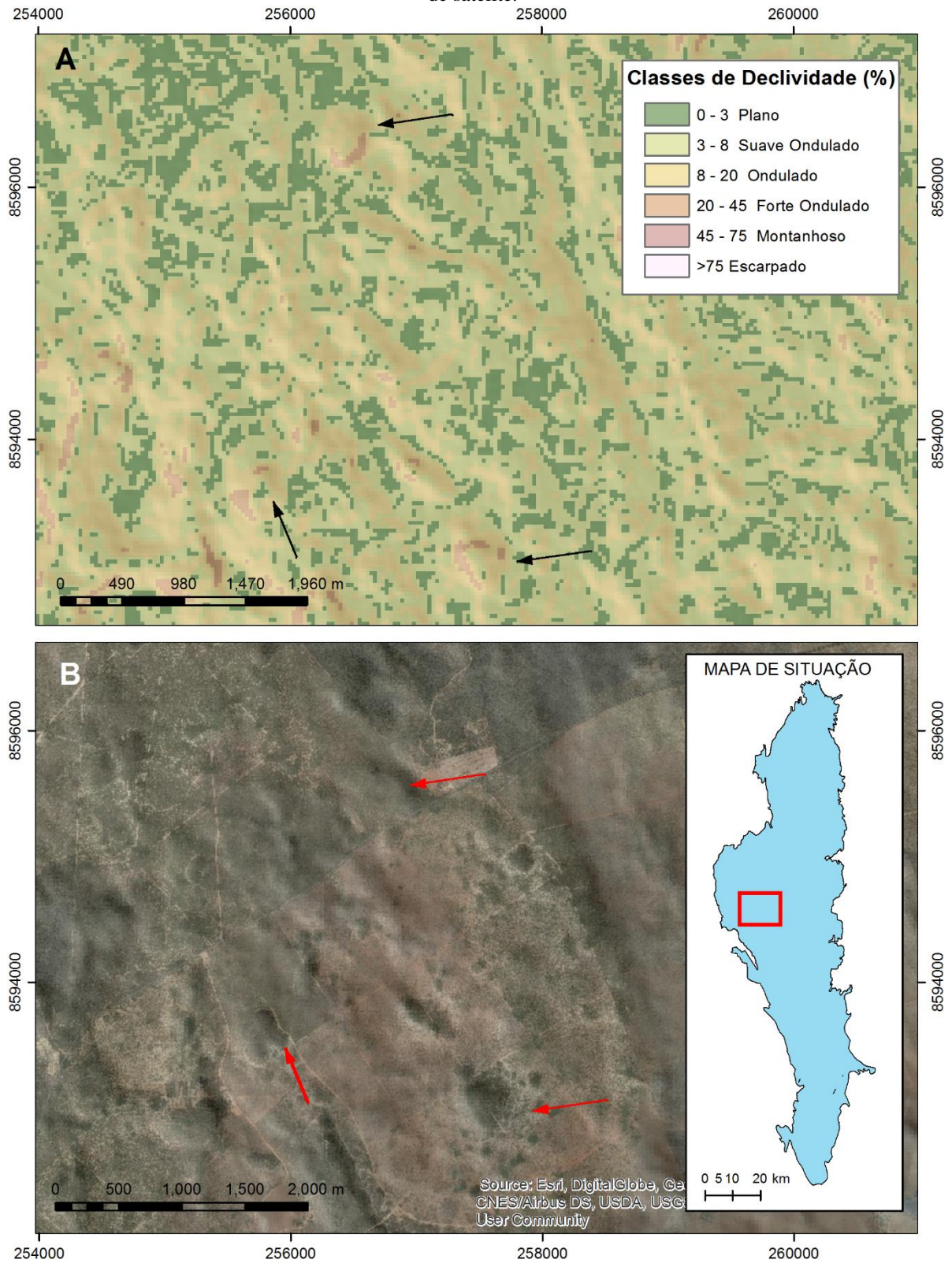
(A) visada para SE e (B) visada para NW – Ao fundo a unidade fisiográfica da Serra do Sincorá e identificadas em (C) imagens de satélite. 8575670 mN/269232 mE/24L, Nova Redenção - BA



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.4.2 – Feições cársticas e declividade.

(A) recorte do mapa de declividade, depressões fechadas indicadas por setas, (B) recorte idêntico em imagem de satélite.

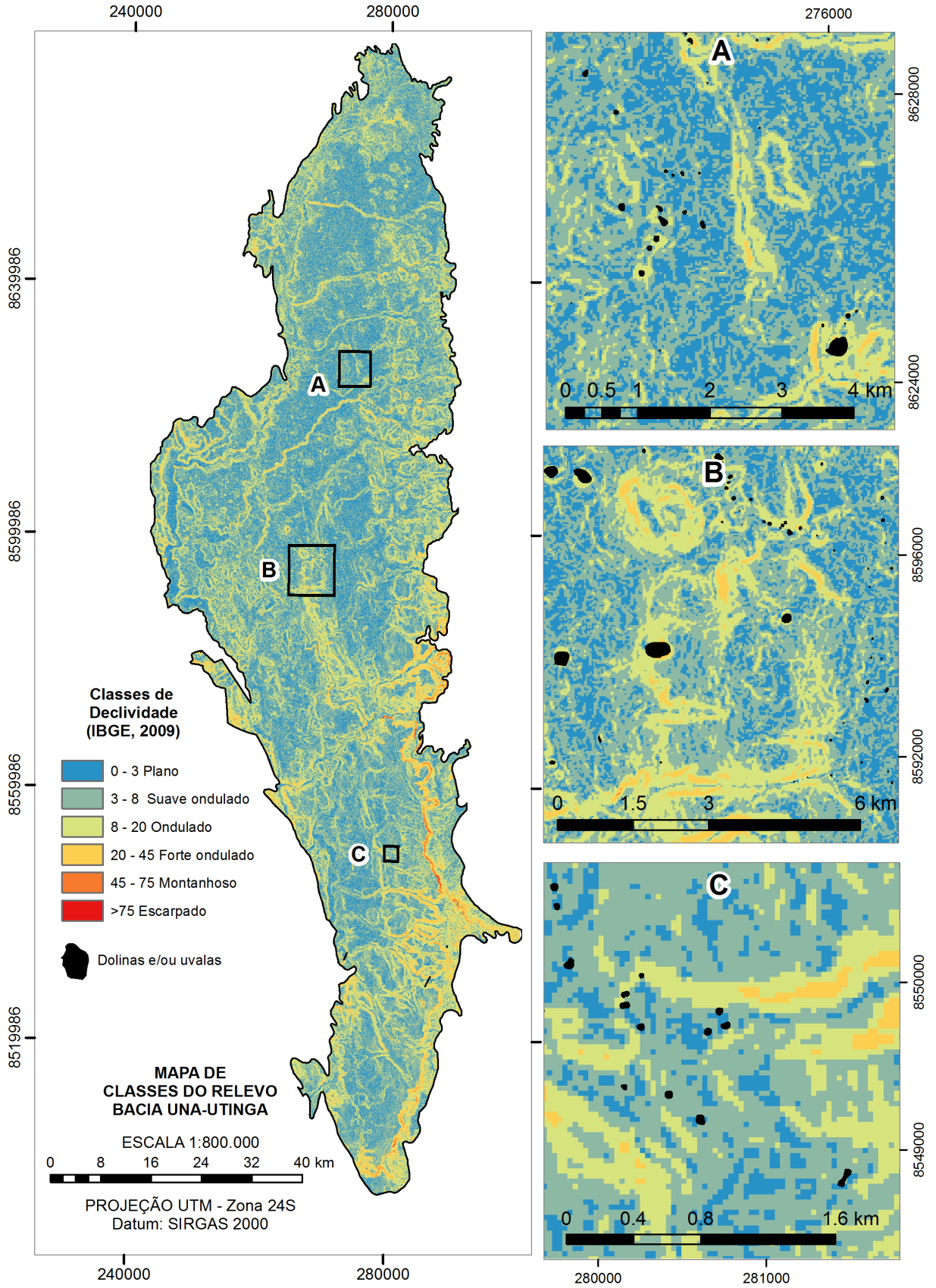


Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que a validação com maior acuidade das feições cársticas se deu com a confecção e confronto com o mapa de divisão de relevo por classes de declividade da BUU, apresentado a partir do zoneamento de classes. As classes de declividades mais representativas da área de estudo são as planas, suavemente onduladas e onduladas (Figura 5.4.3).

Pode ser observado que o mapa de declividade mostra que a classe mais significativa na BUU é a plana, tanto nas áreas mais rebaixadas a exemplos dos vales, quanto para as áreas dos platôs. Observa-se também que a porção sudeste possui as maiores classes de declividade com ângulos acima de 75° , coincidindo com a borda do platô que constitui a grande estrutura geomorfológica da BUU.

Figura 5.4.3 - Mapa de divisão do relevo por classes de declividades, para a área de estudo
Observar recortes da área de estudo mostrando realce das depressões fechadas.



Fonte: Elaboração própria.

5.4.2 Mapa de dolinas e lineamentos estruturais

A representação gráfica desses aspectos é apresentada em escala regional, onde foram usados os dados de checagem de campo a partir de aerofotointerpretação com imagem de satélite *Landsat* e *Rapideye* no *software* ArcGIS 10.5, bem como o uso de modelo sombreado de relevo com iluminação oriunda de N045° (Figura 5.4.4).

Ressalta-se que a sobreposição das informações de feições cársticas e lineamentos estruturais resultaram no mapa da Figura 5.4.4, o qual apresenta feições em detalhe nos recortes de semidetalhe **A**, **B** e **C**, que foram definidos.

De acordo com o resultado do mapa de dolinas e/ou uvalas em toda área de estudo, foram observadas as feições cársticas em grande proporção, bem como lineamentos estruturais que se apresentam em direções variadas, sendo a predominante a NW-SE.

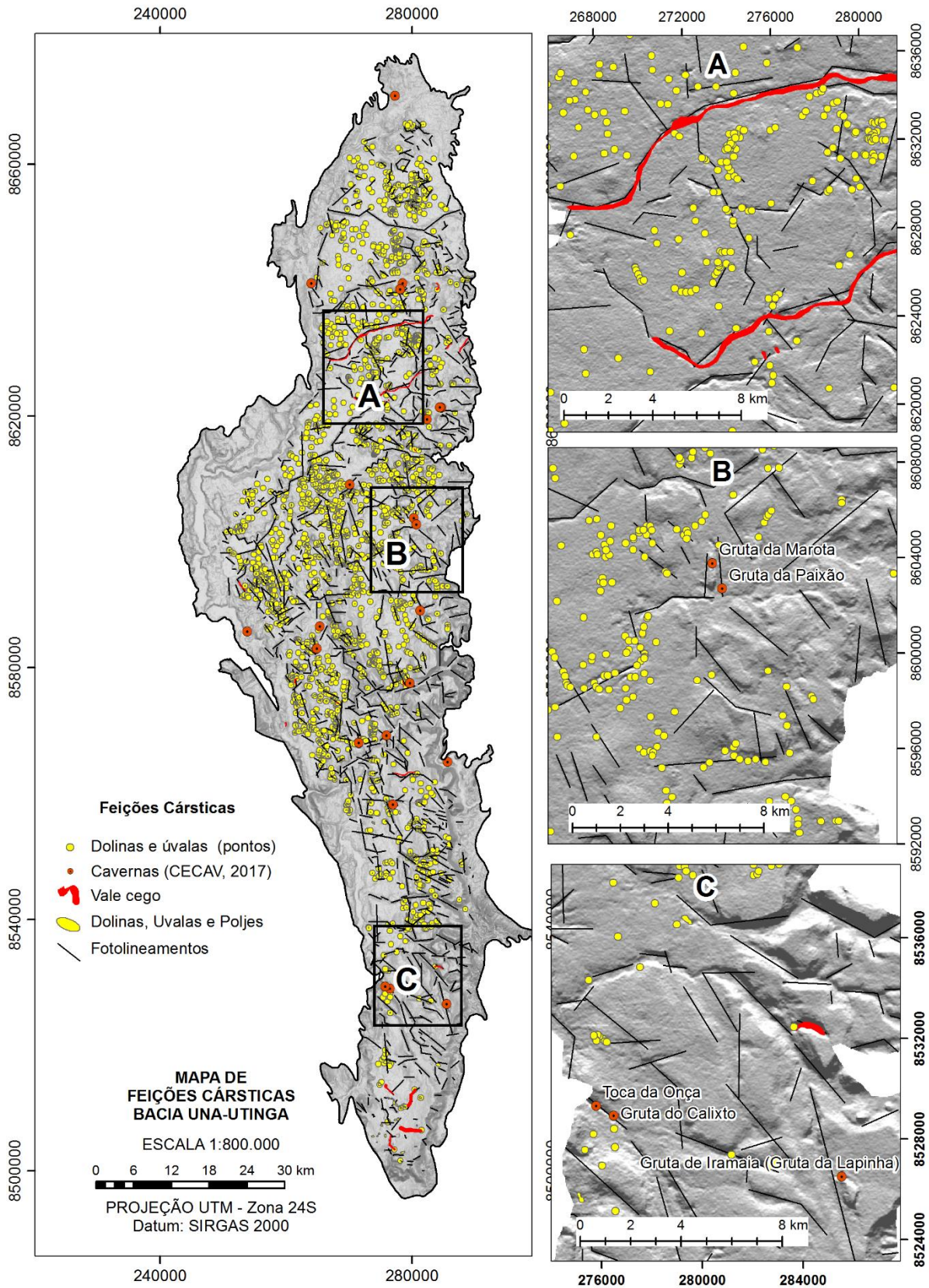
O recorte **A** apresenta agrupamento de dolinas e/ou uvalas (feições exocársticas) na porção norte. Essas feições por vezes são coincidentes com os lineamentos da área, sugerindo a evolução das mesmas diante de zona de fraqueza no substrato. Ainda nessa porção são observados vales cegos, representativos de drenagens pretéritas, as quais desenvolveram-se sobre os lineamentos estruturais.

O recorte **B** apresenta agrupamento de dolinas, além das grutas da Marota e da Paixão. Essas feições por vezes coincidem com lineamentos estruturais. Pode ser observado que as feições endocársticas apresentam-se controladas por lineamentos, sugerindo a evolução destas, a partir daquelas estruturas.

O recorte **C**, que engloba parte da porção Sul da área, apresenta feições exocársticas de forma incipiente, muito embora apresente feições do endocarste com representantes como as grutas Iramaia, Lapinha e Calixto e a Toca da Onça, onde pode ser observada a coincidência dos lineamentos estruturais com essas feições, sugerindo a evolução das mesmas a partir daquelas estruturas.

Figura 5.4.4 - Mapa de dolinas e lineamentos estruturais.

As dolinas e uvalas reconhecíveis são os pontos na cor amarela, polígonos na cor vermelha são os vales cegos e os pontos na cor vermelha são cavernas e/ou grutas.



Fonte: Elaboração própria.

5.4.3 Índice cárstico

O mapa de Índice de Cárstico-IC foi proposto com base nas características das feições fichadas existentes, considerando especialmente as feições negativas, expressas na formação Salitre na Bacia Una-Utinga (BUU). Este mapa é um mapa previsional, no qual se prenuncia as áreas com densidades de feições cársticas, especialmente as feições exócarsticas. Deste modo, a sua aplicação é relevante para a política de gestão ambiental.

A aplicação do IC na área de estudo baseou-se na técnica apresentada por Milan M. Radulovic´ em Stevanovic´ (2015), onde foram trazidas adaptações área da BUU, verificados na metodologia desta pesquisa.

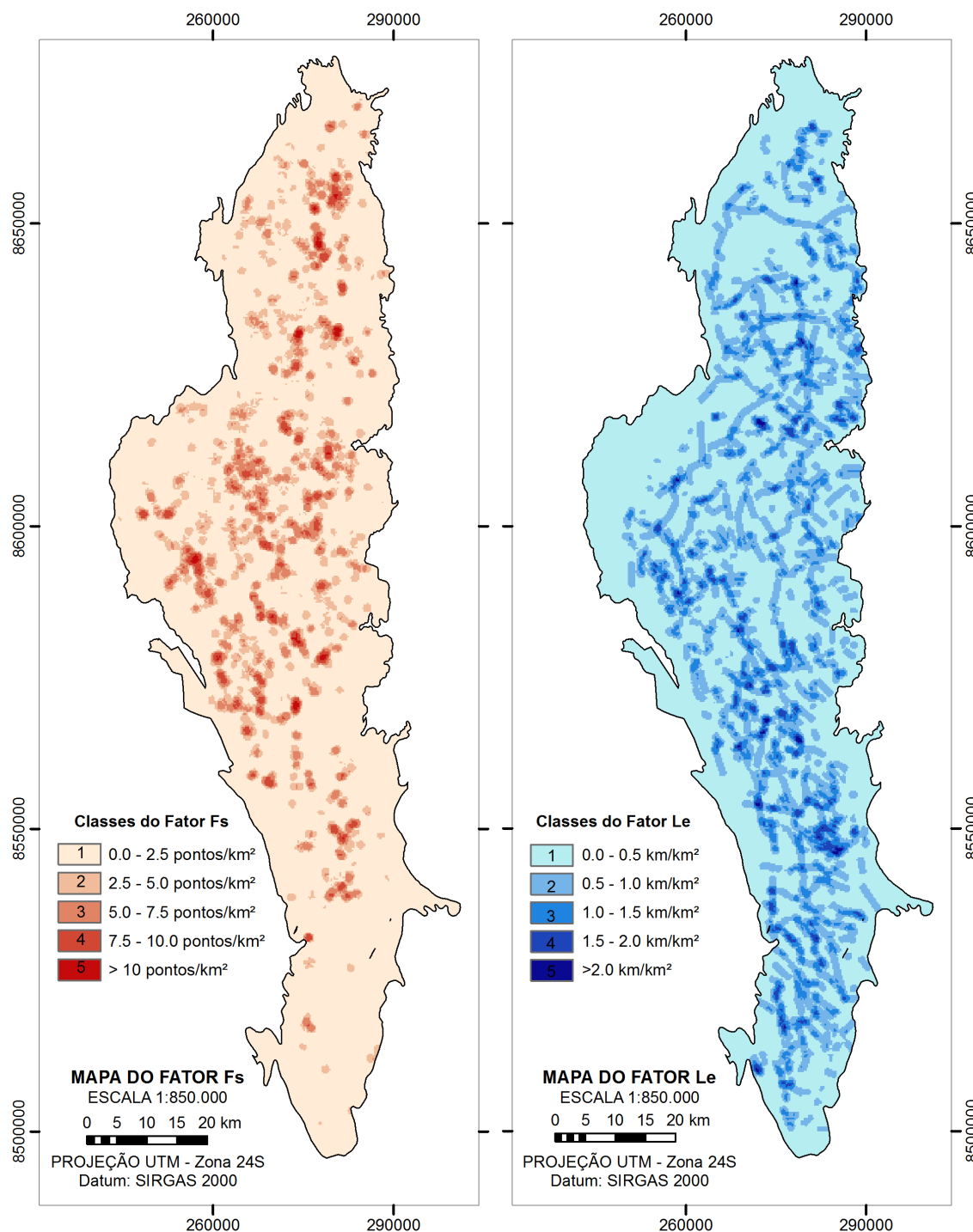
O IC teve como fatores principais para a sua construção o mapa de densidade de dolinas e/ou uvalas mapeadas, correspondente ao fator de feições de superfície (Fator Fs) e o mapa de densidade de lineamentos estruturais, correspondente ao fator de lineamentos (Fator Le), representado por fraturas e falhas ou ainda por representantes da zona subcutânea (PILÓ, 2002), onde a parte superior as rochas subjacentes podem conter material inconsolidado ou não apresentando uma trama de fissuras originada por processos cársticos (Figura 5.4.5).

No mapa de densidade de dolinas (Fator Fs), verifica-se que o adensamento de pontos que caracteriza esse Fator, mostra-se desde o mínimo igual a zero (categoria 1) até valores superiores a dez pontos por km^2 (categoria 5). Observa-se que o adensamento de pontos na porção sul da BUU é incipiente, enquanto que os maiores adensamentos são, na porção mais central de forma dispersa na área, distribuídos no sentido N-S.

No mapa de densidade de lineamentos (Fator Le), verifica-se que o adensamento de quilômetros de linha por quilometro quadrado de área (km/km^2), que caracteriza esse Fator, mostra-se desde o mínimo igual a zero (categoria 1) até valores superiores a 2 km/km^2 (categoria 5). Observa-se que não há um adensamento do Fator Le, onde a distribuição apresenta-se aleatória.

A sobreposição desses dois fatores Fs e Le, ou seja, Fs+Le atrelados às cinco categorias de cada um, resultaram no IC (FS+Le=IC), que “zoneia” o grau carstificação da superfície do terreno, prevendo a ocorrência de feições cársticas da área de estudo (Figura 5.4.6). Nesta Figura, quando comparada com a Figura 5.4.4, é observado que a previsão de “zoneamento” das áreas mais carstificadas é em sua maioria, acertiva e coincidente, com área de maiores ocorrências de dolinas e lineamentos estruturais.

Figura 5.4.5 - Mapa de densidade de dolinas (Fator Fs) e Mapa de densidade de lineamento (Fator Le)



Fonte: Elaboração própria.

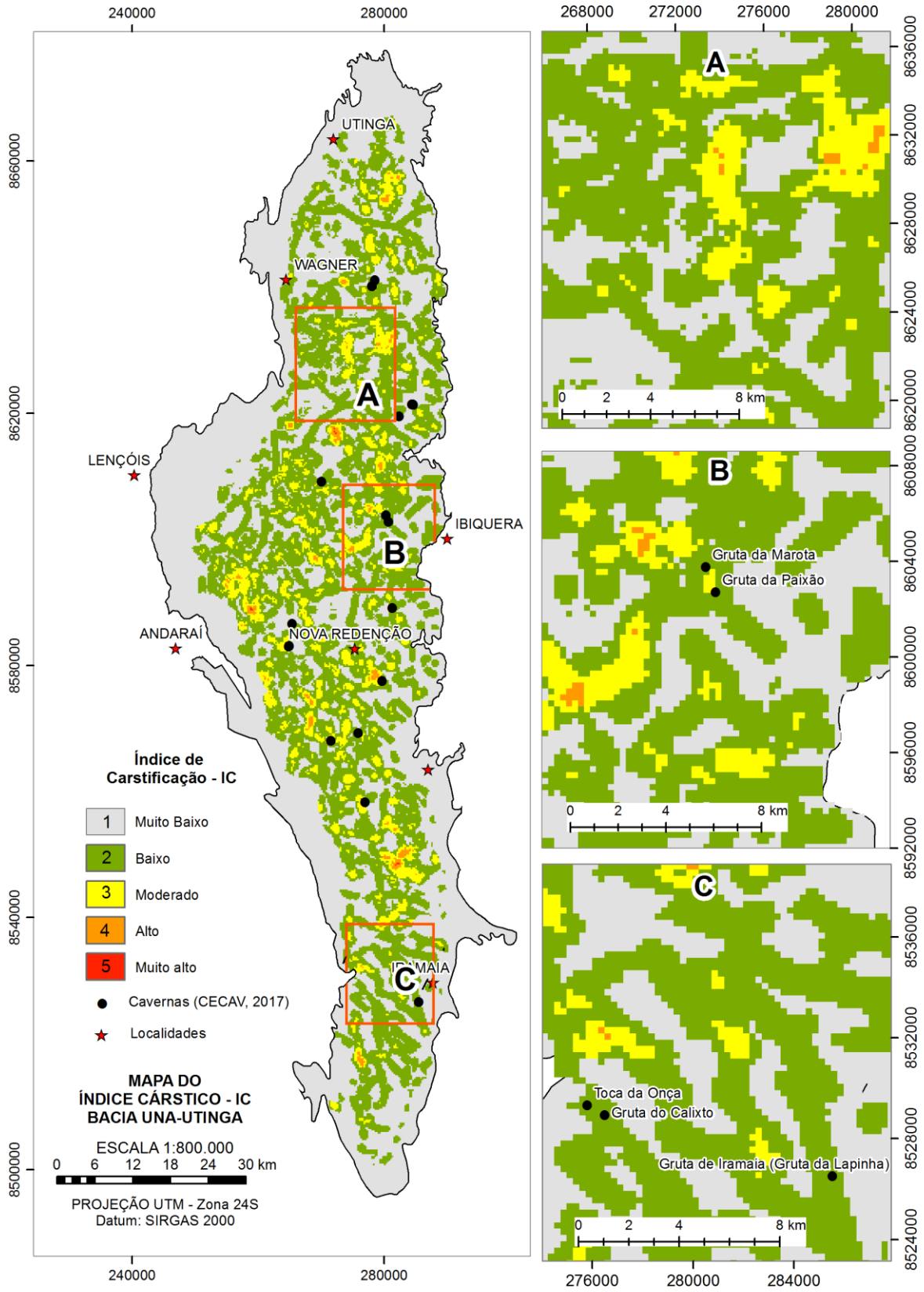
Eventualmente, as categorias coincidiram uma com a outra ou divergiram, isso de acordo com a soma dos fatores (Fs e Le). Nem sempre a maior categoria de um fator coincidiu com a maior categoria do outro. Quando isso ocorreu, o IC atingiu os valores da categoria alta e muito alta.

Aferiu-se para o IC, então, cinco (05) classes de carstificação, onde se pode verificar também o tamanho da área que contém as classes por quilômetros quadrados. Para tanto se classificou em: muito baixo (1341 km²), baixo (1386 km²), moderado (336 km²), alto (26 km²) e muito alto (1 km²). Se observa que as classes, muito baixa e baixa são as que predominam na área de estudo. Verifica-se, portanto, que a representatividade dessas classes, em sua maioria, é de feições cársticas superficiais.

Assim, é verificado que as áreas com indicativos de grau de carstificação menor, ou seja, IC com classes muito baixa e baixa, prevê maior expressão de feições cársticas superficiais, e abrangem uma área de 2727km².

Enquanto que as áreas com IC com classes moderada, alta e muito alta, preveem maior expressão de feições cársticas mais profundas abrangendo uma área de 363 km² na BUU, o que pode ser também constatado também por Radulovic', Stevanovic' e Radulovic' (2012).

Essas classes preveem porções em que as feições cársticas profundas coincidem, variavelmente, com cavernas e ou grutas existentes da BUU. Tais porções foram definidas nesse estudo como ilhas cársticas – Ilc.



Fonte: Elaboração própria.

Pode ser observada na Figura 5.5.7 e 5.5.8, que as 22 cavernas catalogadas na BUU pelo CECAV (2017), e as identificadas em campo, podem ou não ocorrer dentro do IC previsto como de maior evolução cárstica (Ilc).

Verifica-se que, na Figura 5.5.7, o IC prevê de forma assertiva as feições cársticas mais profundas, dentro do IC proposto. Enquanto que na Figura 5.5.8, a previsão não é totalmente assertiva, configurando que a aplicação do IC prevê as feições cársticas superficiais com maior acuidade.

As Ilc reveladas pelo IC ocorrem na BUU de forma restrita, abrangendo principalmente a unidade Nova América (subunidade Lapão) da Formação do Salitre (Figura 5.5.9).

Assim, as feições cársticas mais evoluídas ocorrem abrangendo uma área que recobre aproximadamente 20% da unidade Nova América (subunidade Lapão), enquanto que na unidade Gabriel/Nova América, esse zoneamento do IC ocorre recobrando aproximadamente 8% da área.

A Unidade Nova América (subunidade Lapão) ocupa uma menor porção dentro da BUU, aproximadamente 361 km², porém apresentou maior percentual de ocorrências de Ilc, onde são evidenciadas as maiores demonstrações de densidade de lineamentos estruturais (Le), bem como de densidade de dolineamento (Fs).

Assim, é onde ocorre maior expressão de lineamentos (fraturas e falhas) caracterizando maior Lf e promove maior circulação de água sobre o material geológico, sugerindo que nessa Unidade o carste tem maior evolução.

Figura 5.5.7 - Caverna na Fazenda Natal, próxima a gruta do Poço Encantado e da Lapa do Bode. São feições cársticas mais profundas, coincidentes com a classificação do IC (moderada, alta e muito alta, IIc). 8562290 mN/273243 mE/24L, Itaetê – BA

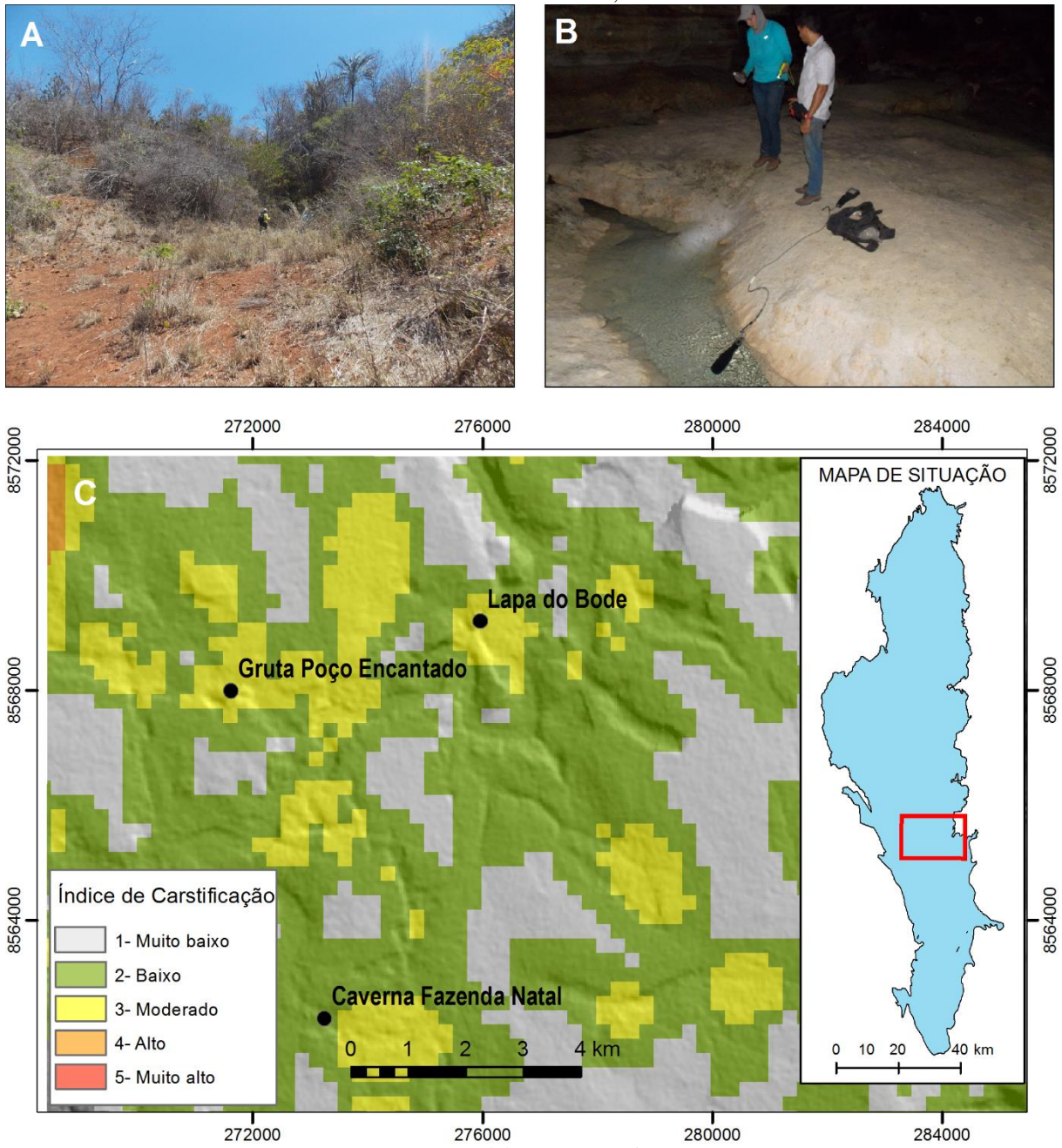
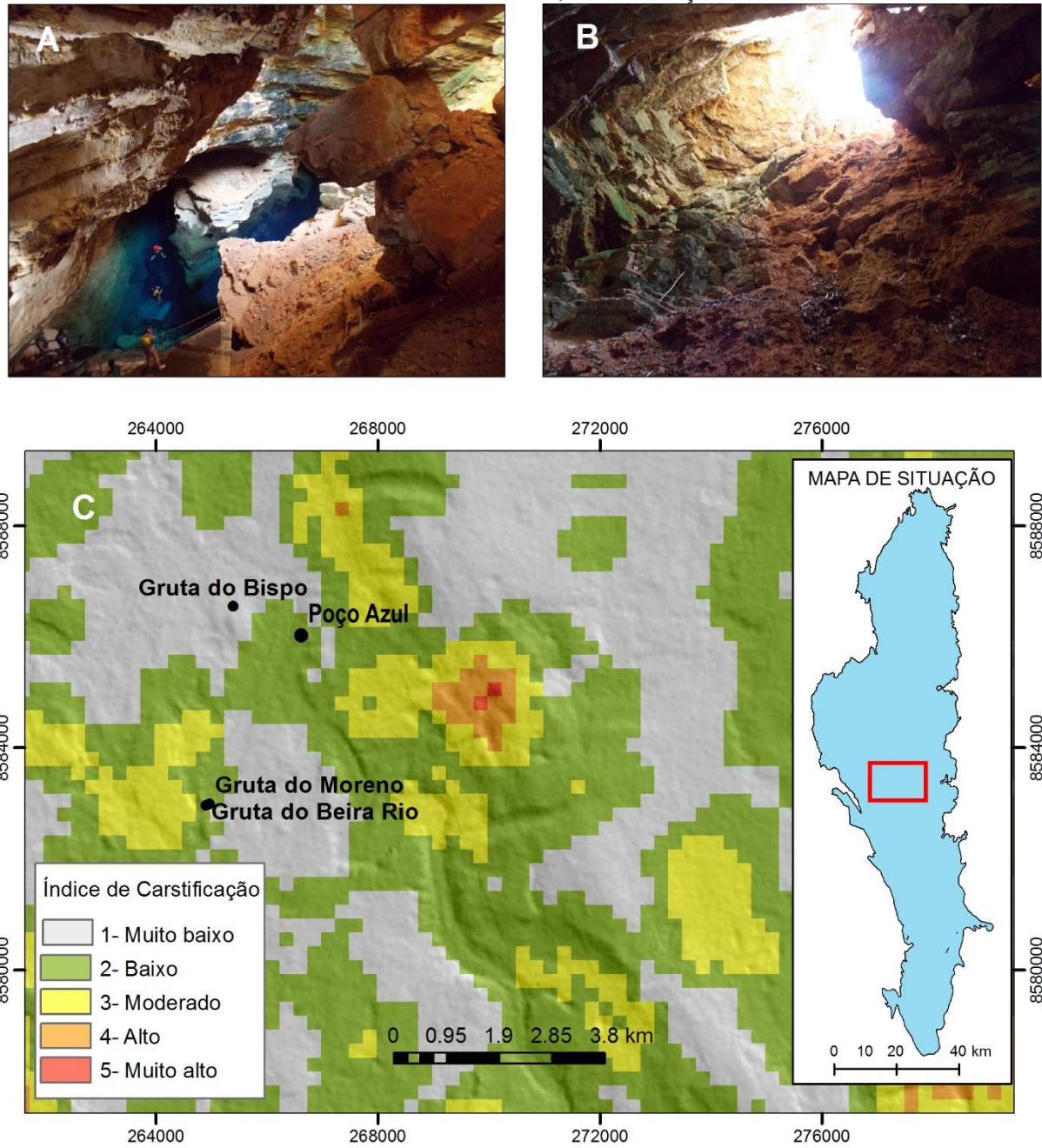
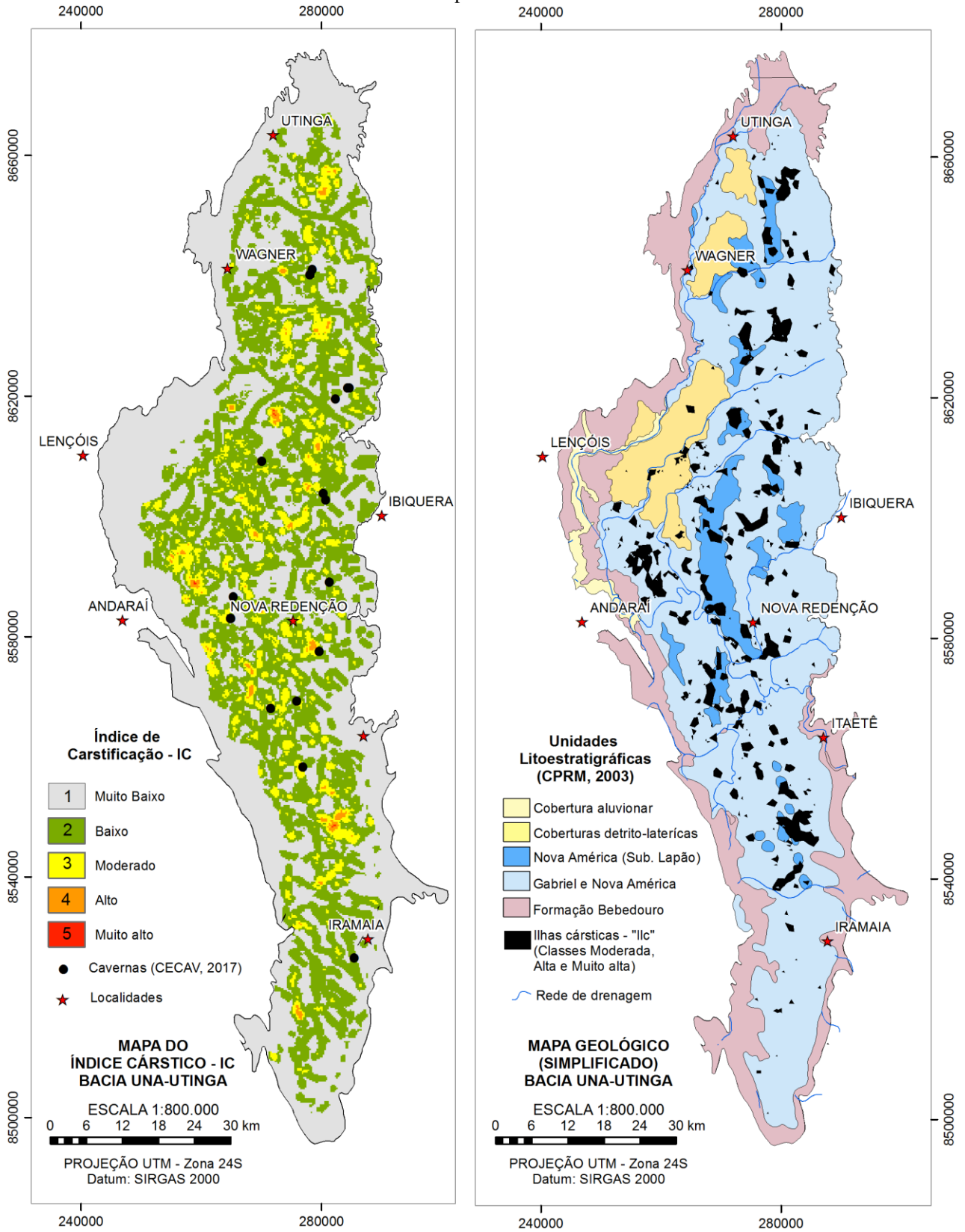


Figura 5.5.8 - Caverna Poço Azul, localizada na porção Sul da área de estudo.
88586027 mN/266623 mE/24L, Nova Redenção – BA



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.5.9 - Representação gráfica das ocorrências das ilhas cársticas na Unidade Nova América, subunidade Lapão



Fonte: Elaboração própria

5.5 VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO CÁRSTICO NA BUU

As características peculiares apresentadas pelas Unidades Gabriel/Nova América e Nova América subunidade Lapão, como granulometria, espessura, característica litológica, índice de carstificação, presença de feições de captação (sumidouros), além da cobertura vegetal, tipo de solo e espessura do mesmo e precipitação, foram fundamentais para compor os mapas de vulnerabilidade à contaminação do aquífero Salitre na BUU.

A seguir os resultados dos métodos COP e PI utilizados para análise da vulnerabilidade intrínseca na área.

5.5.1 O método COP

Os Fatores C, O e P são avaliados separadamente e são unificados resultando do mapa COP.

O Fator C representa a redução da proteção do aquífero. Foram atribuídos valores considerando a declividade, vegetação, feições cársticas e a existência de áreas de captação de sumidouros. No cenário 1 que considera as áreas de captação dos sumidouros, pontuou-se também as ilhas cársticas – Ilc, definidas no Índice de Carstificação (IC), vide item 5.4.

Assim, para o mapa C foi verificada 5 classes, desde muito alta redução de proteção até muito baixa, onde as áreas com mais alta redução são caracterizadas pelos sumidouros e suas áreas de recargas, áreas com superfície de faturamento, e também as Ilc (Figura 5.5.1).

Para o Fator O foram atribuídos valores considerando o parâmetro Os (solo), e Oi (litologias) para as Unidades do Grupo Una.

Assim, o mapa O resultou em duas classes para valor de proteção, consideradas como muito alta e alta, respectivamente Formação Bebedouro e Formação Salitre. Resultando num valor de vulnerabilidade muito baixo e baixo (Figura 5.5.1).

Como resultado para o mapa P foram exibidas duas classes, alta e baixa, e foi considerado não representativo da realidade da precipitação na BUU, por conta da distribuição das estações pluviométricas.

O mapa COP é o resultado do produto dos mapas C, O e P (Figura 5.5.1), onde foi verificada a exibição de cinco classes de vulnerabilidade, desde muito alta à muito baixa vulnerabilidade.

Ressalta-se que quanto maior a vulnerabilidade menor a proteção do aquífero. Assim, pelo método COP, nas Ilc bem, como na Unidade geológica Nova América subunidade

Lapão observa-se que os maiores índices de vulnerabilidade para o sistema aquífero da BUU.

5.5.2 O método PI

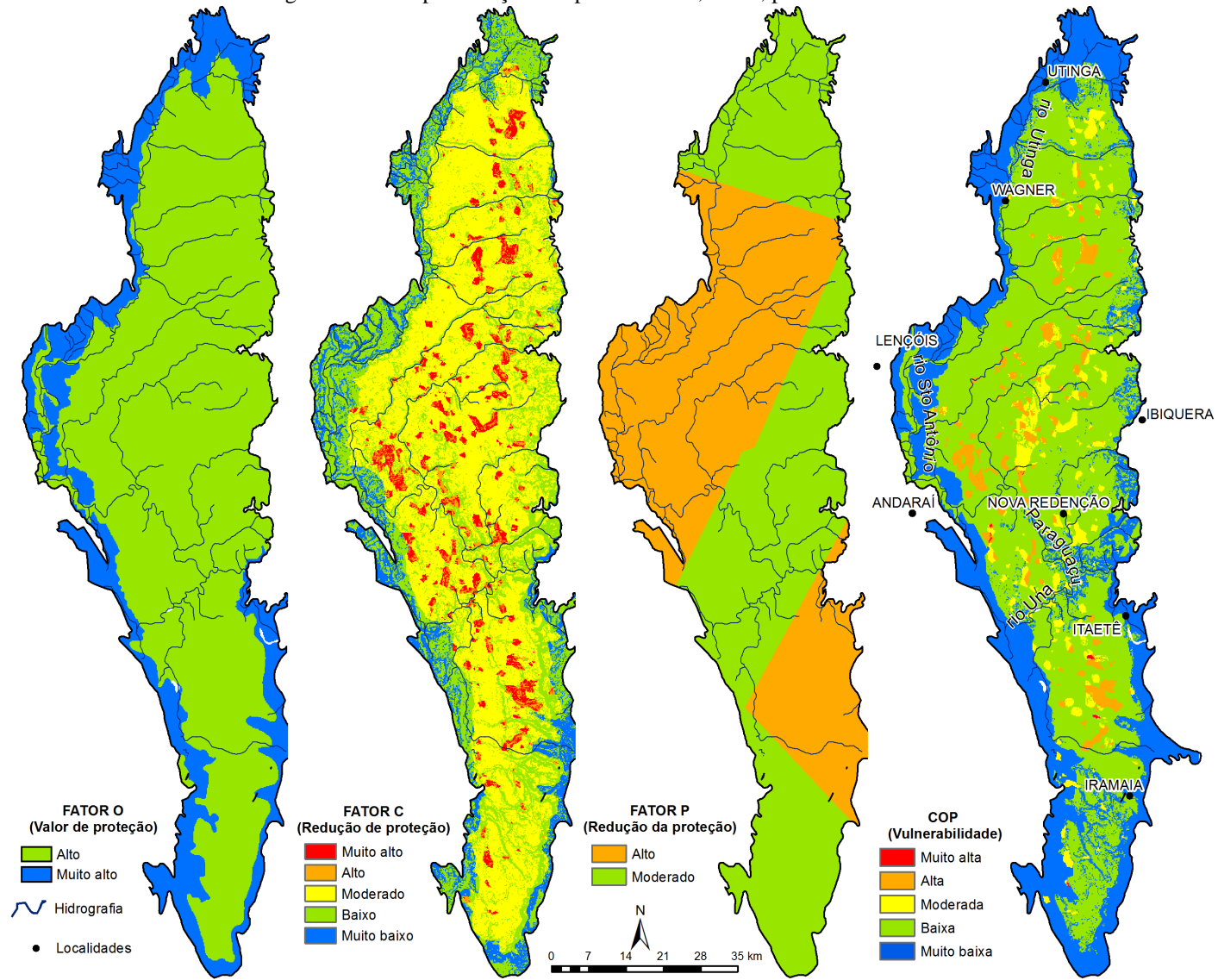
Os Fatores P e I são avaliados separadamente e são multiplicados resultando no mapa PI.

Assim, o mapa do Fator P apresenta duas classes de eficácia de proteção, média e alta, respectivamente Formação Bebedouro e Unidade Nova América subunidade Lapão e a Unidade Gabriel/Nova América (Figura 5.5.2).

Para o Fator I) foram obtidas cinco classes de proteção, onde percebe-se uma desarmonia dos dados, em que a classe muito alta ocupa grande parte da BUU, ficando as outras classes restritas a pequenas porções da área de estudo (Figura 5.5.2).

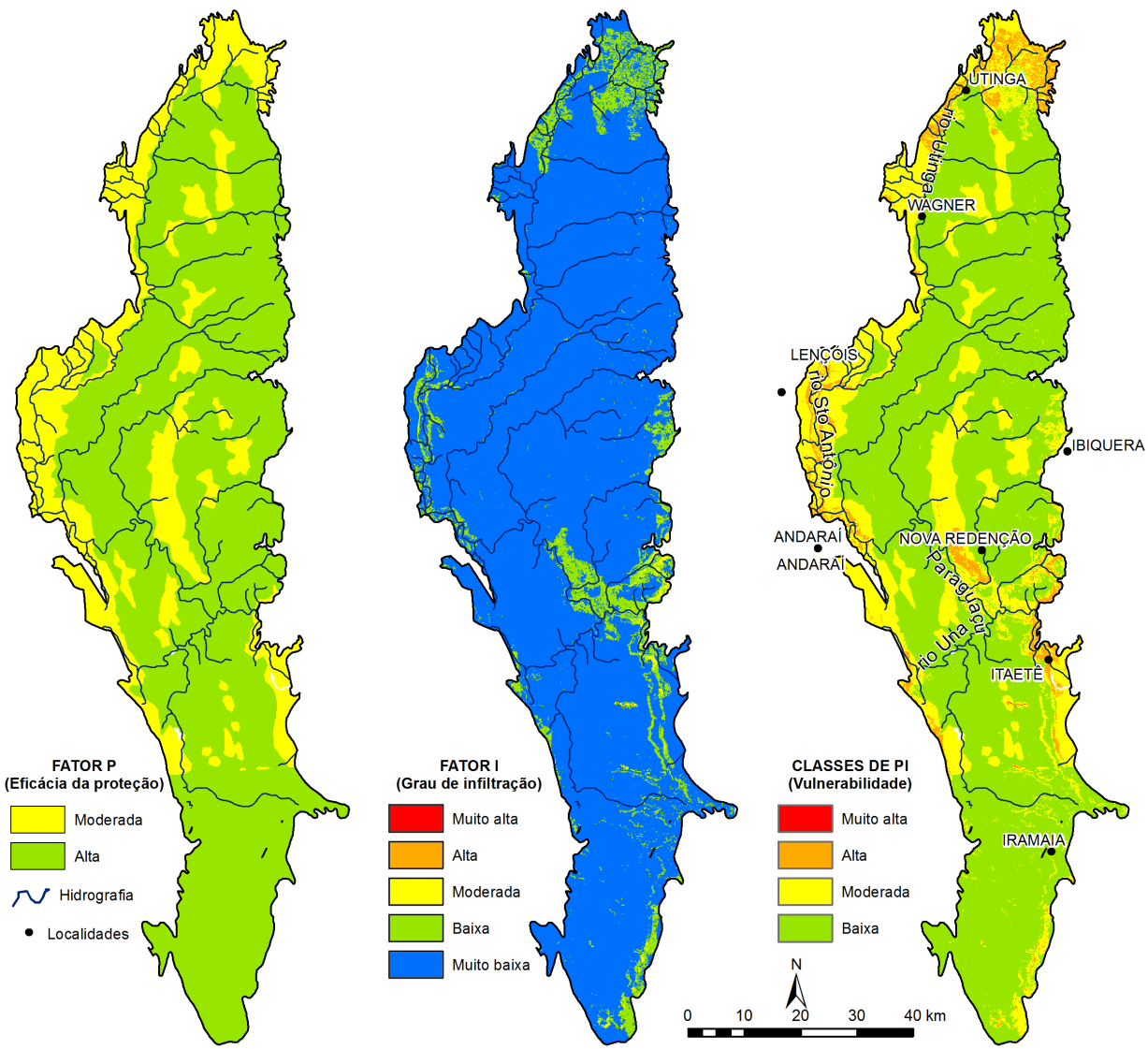
O mapa PI apresenta quatro classes de muito alta a baixa vulnerabilidade, que ocorrem respectivamente na Formação Bebedouro e Unidade Nova América Lapão e baixa na Unidade Gabriel/Nova América (Figura 5.5.2).

Figura 5.5.1 - Representação dos parâmetros C, O e P, para o método COP



Fonte: Elaboração própria.

Figura 5.5.2 - Representação dos parâmetros P e I, para o método PI



Fonte: Elaboração própria.

5.5.3 Comparação entre o COP e o PI

A tabela 5.5.1, apresenta as similaridades e discrepâncias entre os métodos aplicados na BUU.

Para o método COP foram exibidas 5 classes de vulnerabilidade, que variou desde muito alta a muito baixa, onde a muito alta está associada as ilhas cársticas - Ilc, bem com as áreas de recarga dos sumidouros. Exibiu ainda que a vulnerabilidade baixa é representada pela área que a Formação Bebedouro ocupa.

Para o método PI foram exibidas 4 classes de vulnerabilidade, que variou desde muito alta à baixa, onde a muito alta está associada de forma restrita com as áreas de recarga dos sumidouros. Exibiu ainda que a vulnerabilidade média é representada pela área que a Formação Bebedouro ocupa. Assim, a aplicação do método PI para a BUU em comparação ao COP exibiu respostas com ressalvas se tornando menos aceitável.

Tabela 5.5.1 - Similaridade e/ou discrepâncias entre os métodos

COP	PI
5 classes	4 classes
Formação Bebedouro: vulnerabilidade baixa	Formação Bebedouro: vulnerabilidade média
Ilc com vulnerabilidade muito alta	Não houve opção para uso das Ilc
Resposta muito mais assertiva para a BUU	Resposta com ressalvas para aplicação na BUU
Vulnerabilidade muito alta com melhor distribuição nas áreas de recarga dos sumidouros	Vulnerabilidade muito alta com distribuição restrita nas áreas de recarga dos sumidouros

Fonte: Elaboração própria.

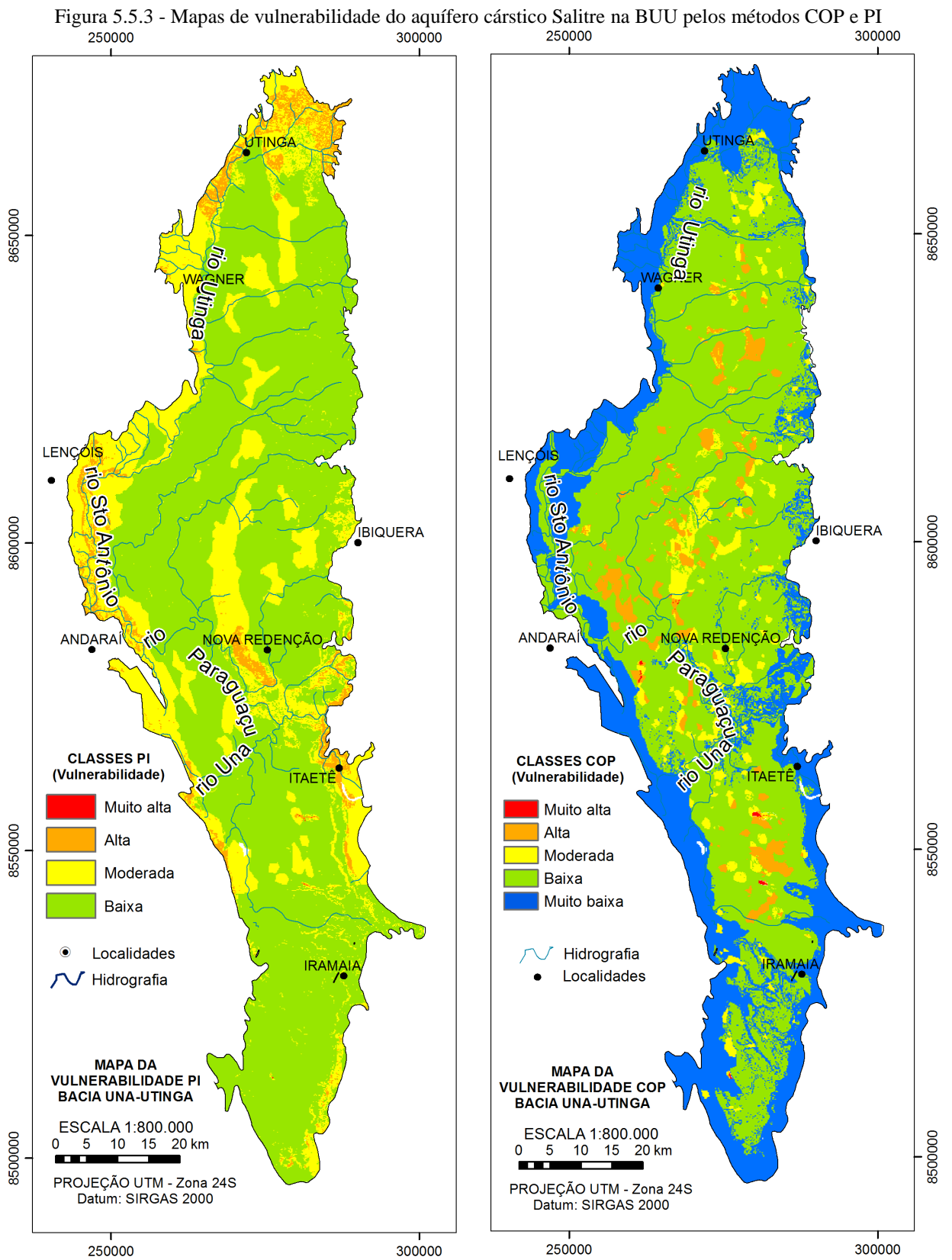
A Tabela 5.5.2, apresenta as classes de vulnerabilidade dos métodos e suas relações com as feições (aspectos) regionais.

Para o método COP, é verificada que as feições cársticas de superfície, que engloba as Ilc, bem como as áreas de recargas dos sumidouros, são bastante representativas quanto a vulnerabilidade, estando atreladas especialmente a área em que o aquífero cárstico Salitre encontra-se inserida.

Para o método PI, é verificada a imprecisão do método diante dos aspectos analisados, já que o mesmo é mais generalista nas opções geológicas apresentadas.

A fim de melhor visualização, a Figura 5.5.3 produz os mapas finais para os métodos COP e PI, onde se pode comparar as respostas dos métodos e a distribuição espacial

das classes de vulnerabilidade na BUU.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.5.2 - Classes de vulnerabilidade dos métodos COP e PI e suas relações com feições e aspectos regionais

Métodos	Classes de vulnerabilidades				
	Muito alta	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa
COP	Feições cársticas de superfície	Feições cársticas de superfície	Feições cársticas de superfície	Litologia e feições cársticas de superfície	Litologia e ausência de feições cársticas de superfície
PI	Áreas de captação do sumidouro, pouco expressiva	*Superfície fortemente carstificada (restrita)	**Litologia e fraturamento	Litologia e infiltração	Não exibido

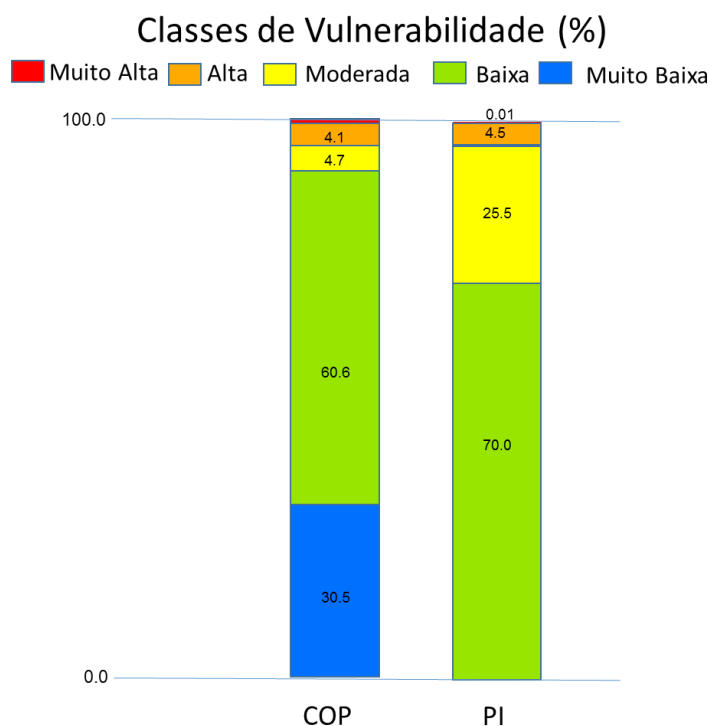
*As áreas de alta vulnerabilidade obtidas fora das unidades carbonáticas são o resultado entre a interação da declividade, cobertura vegetal e condicionamento hidráulico do solo saturado, utilizada no cálculo do Fator I, do mapa PI.

** As áreas de moderada vulnerabilidade obtidas fora das unidades carbonáticas são justificadas pela categorização litológica oferecida pelo método PI

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5.5.4, exibe o gráfico de percentual de concordância espacial entre os métodos COP e PI.

Figura 5.5.4 - Representação do percentual (comparativo) das classes de vulnerabilidade nos métodos COP e PI



Fonte: Elaboração própria.

Para o Gráfico mostrado na Figura 5.5.4 verifica-se que os percentuais para a classe de vulnerabilidade muito alta apresentam-se pequenos. Muito embora a expressão em mapa

seja extremamente restrita nos dois métodos, pode ser verificado que o mapa COP exibe essa classe com melhor expressão.

Os percentuais da classe de vulnerabilidade alta se apresentam dentro da mesma faixa, existe concordância em termos de espacialização, porém as áreas de ocorrências são distintas. No COP corresponde às áreas de maior carstificação, especialmente as Ilc. E no PI ocorrem restritamente na Unidade Nova América subunidade Lapão e na Formação Bebedouro.

Para a classe de vulnerabilidade moderada os percentuais se apresentam de forma discrepante entre os métodos. No COP menos expressivo nas Ilc e Unidade Nova América subunidade Lapão. E no PI com maior distribuição na Unidade Nova América subunidade Lapão e Formação Bebedouro.

Os percentuais da classe de vulnerabilidade baixa se apresentam em ambos métodos com maior expressão espacial e coincidem com a Formação Salitre.

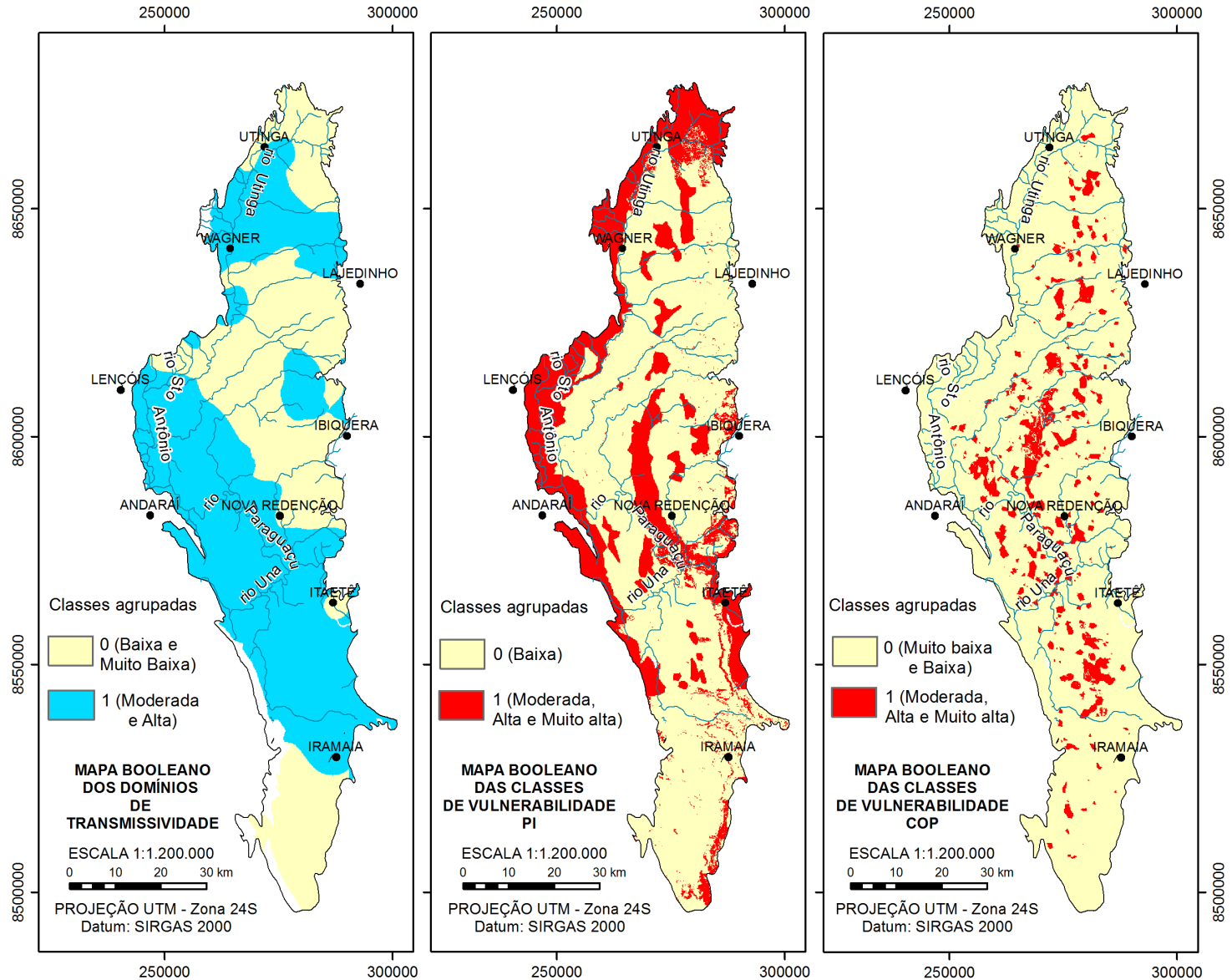
Para a classe de vulnerabilidade muito baixa o percentual se apresenta apenas com exibição no mapa COP, com uma expressão espacial representativa, bordejando todo aquífero Salitre, correspondendo à Formação Bebedouro.

5.5.4 Relação entre a potencialidade do aquífero Salitre, associação à contaminação

Ao confrontar os domínios da transmissividade com os domínios da vulnerabilidade no aquífero Salitre na BUU, observou-se a sobreposição de áreas de transmissividade alta a muito alta coincidindo com domínios de vulnerabilidade de moderada, alta, muito alta em ambos os métodos PI e COP.

Por essa razão, optou-se por realizar uma inferência espacial através do método booleano cruzando cada mapa de vulnerabilidade com o mapa de classes de transmissividade. Os domínios de transmissividade alta e muito alta foram agrupados no valor “1” e os domínios de transmissividade baixa e moderada foram reclassificadas para “0”. No caso das classes de vulnerabilidade, as classes moderada, alta e muito alta foram agrupadas em “1” e as classes de vulnerabilidade baixa e muito baixa em “0” (Figura 5.5.5).

Figura 5.5.5 - Mapas binários “0” e “1” para a Transmissividade, Vulnerabilidade PI e Vulnerabilidade COP na área da BUU



Fonte: Elaboração própria.

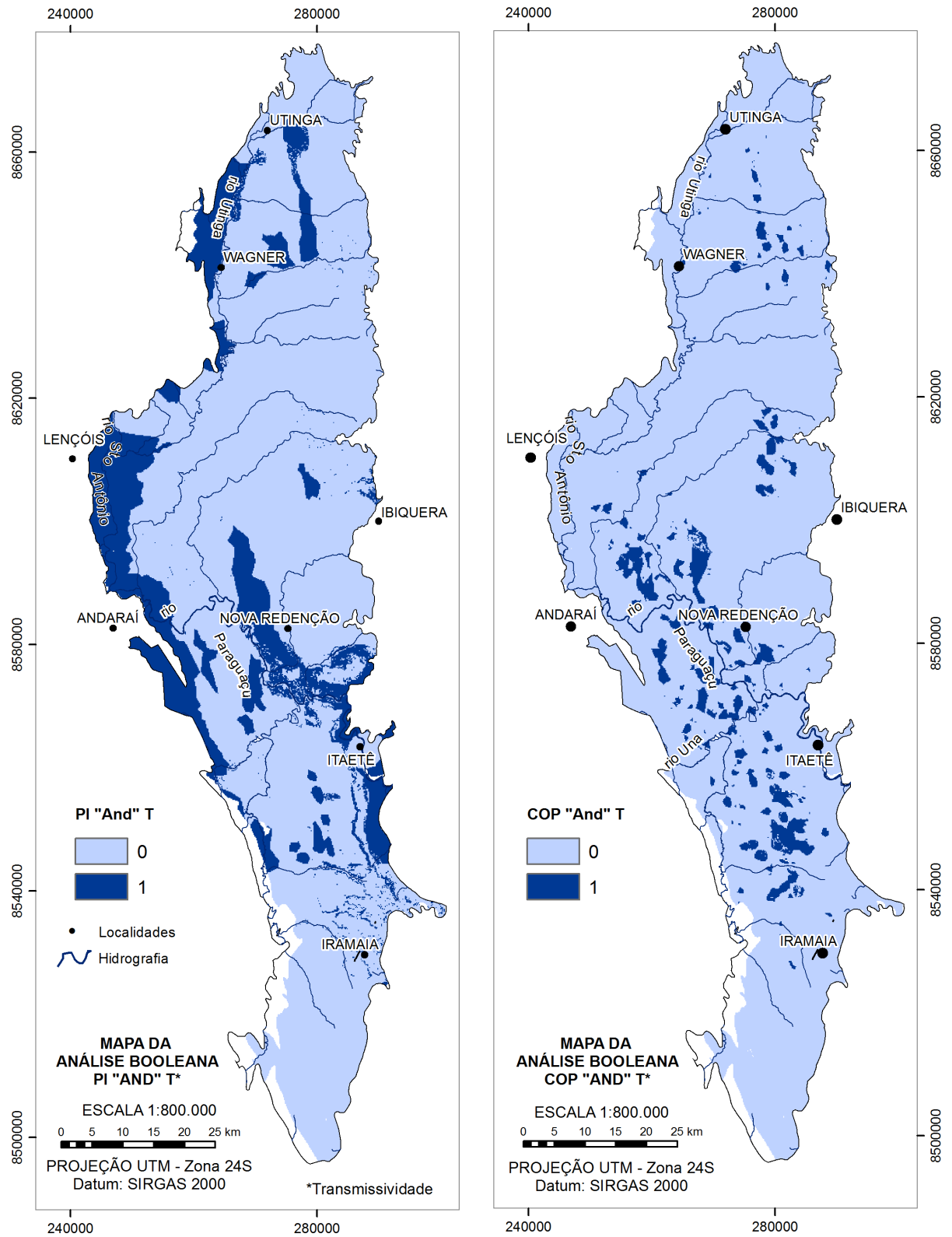
Os mapas finais (Figura 5.5.6) foram operados pela álgebra de mapas através do operador booleano “AND”, e mostram as áreas de interseção entre as classes de grande relevância para “T” para a vulnerabilidade.

De acordo com indicador de potencialidade a partir de T alta e muito alta, pode ser observada na Figura 5.5.6 a relação entre a potencialidade do aquífero cárstico Salitre na BUU e os métodos de análise da vulnerabilidade, considerando as classes de moderada, alta e muito alta de vulnerabilidade.

Pode ser observado que o mapa PI exhibe áreas mais expressivas diante da alta potencialidade do aquífero, diferentemente do mapa COP que exhibe uma área mais restrita.

Muito embora o cruzamento do método PI com a T exhiba mais áreas com risco, o cruzamento do COP com T, diante da sua maior confiabilidade de inserção de dados, representa de forma mais fidedigna as áreas de diante do risco à contaminação (Figura 5.5.6).

Figura 5.5.6 – Mapas binários “0” e “1” gerados pelo método booleano utilizando o operador “AND”.
 A) Mapa binário de Transmissividade (T) versus Vulnerabilidade PI. B) Mapa binário de Transmissividade (T) versus Vulnerabilidade COP



Fonte: Elaboração própria.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Para este trabalho chegou-se às seguintes conclusões acerca das avaliações realizadas na Bacia Una-Utinga, especialmente no aquífero cárstico Salitre:

A avaliação do diagrama de Piper, considerando 52 poços no aquífero cárstico Salitre, exibiu fácies hidroquímicas com 58% de águas Bicarbonatadas, 23% Cloretadas, 13% Mistas e 6% Sulfatadas.

Aplicou-se a Resolução CONAMA 357/2005 nos 58 pontos amostrados na área da BUU e verificou-se que 48% das amostras representam água doce, 33% salobra e 19% salgada. Assim, quanto a salinidade, a maioria das águas são doce.

De acordo com o diagrama de Gibbs, na relação de STD por $Cl/Cl+HCO_3$, as amostras apresentaram dois grupos. O maior deles representado pela dissolução e maior relação da interação água-rocha. O outro grupo representa as amostras com evaporação dominante, relacionado a salinização dessas águas.

As águas Cloretadas ocorrem com maior convergência para a porção leste da BUU; observa-se também maior tendência de salinização. Enquanto que, na porção oeste, onde ocorre maior precipitação na área, as águas Bicarbonatadas e doces são mais representativas.

As áreas de descarga e recarga do aquífero podem interferir não só na salinização como também nas fácies hidroquímicas, atrelados a maior ou menor precipitação, o que pode acarretar infiltração rápida ou maior interação água-rocha.

Em termos de isótopos, os pontos amostrados PA04, PA32 e AG001 apresentaram razão de $\delta^{18}O$ de 2,85‰, 4,63‰ e 13,675‰, respectivamente. Sendo interpretadas como águas que sofreram processo de evaporação. Seja ele oriundo de uma evaporação na zona vadosa do aquífero, seja pela evaporação de águas superficiais (e.g. ciclo hidrológico).

O PA04 encontra-se no limite da borda sul do platô cárstico e em contato com outras litologias, sugerindo uma mistura de fontes de águas diferentes, onde esse fluido percola as fraturas da rocha carbonática podendo ocorrer uma evaporação interna, ou ainda a evaporação antes da infiltração. O PA32 e o AG001 tratam-se de água superficial, a qual pode apresentar a razão isotópica de oxigênio mais evaporada.

Os resultados para $\delta^{18}O$ e δD apresentaram padrão isotópico equivalente. Muito embora, regionalmente, exibem uma tendência de águas mais evaporadas na porção oeste, enquanto que na porção leste exibem assinaturas isotópicas mais empobrecidas (negativas).

Apesar de ser um indicativo sutil, pode sugerir que na porção oeste ocorra mais evaporação na zona vadosa, já que, de acordo com mapeamento da geológico, nesta porção da BUU ocorrem coberturas cenozoicas bem desenvolvidas, podendo estas serem o fator condicionante em haver maior evaporação na zona vadosa.

Ao comparar as amostras da BUU e as amostras de água de chuva sobre a LMG, observa-se uma variação amostral, onde a maioria das amostras está sobreposta ou muito próxima a LMG. As amostras apresentam padrão isotópico semelhante ao da água da chuva, sugerindo uma rápida infiltração das águas superficiais e de precipitação no aquífero.

A relação apresentada no diagrama cartesiano, entre STD e $\delta^{18}\text{O}$, permitiu separar 3 classes. (1) as águas apresentam-se mais evaporadas, onde o $\delta^{18}\text{O}$ é mais enriquecido e o STD varia entre 255 e 618 mg/L. (2) a maioria dos pontos amostrados com padrão isotópico semelhante, variando entre si de águas mais ou menos evaporadas, sem muita variação na razão isotópica, muito embora os valores de STD variam entre 300 e 931 ml/L.

(3) os pontos apresentam águas mais salinas, onde o STD varia entre 1060 a 2960 mg/L, sem quase nenhuma variação na razão isotópica, podendo ser associado a interação água rocha e não a evaporação, possivelmente devido a rápida infiltração.

O padrão isotópico resultante dos estudos no aquífero cárstico Salitre, bem como no seu correspondente no Oeste, o aquífero Bambuí, somados aos apresentados nesta pesquisa, sugerem, para a maioria dos pontos em análise, que as recargas destes aquíferos ocorrem associadas a eventos de precipitação semelhantes.

A transmissividade (T) resultou na função $T_{\text{empírica}} = 0,82 * Sc^{0,89}$. Entretanto, devido à grande extensão da área em estudo, ocorre dispersão resultando no elevado grau de aleatoriedade, assim as variáveis tiveram que ser logaritimizadas. O modelo apresentado é passível de atualizações com a entrada de novos dados, a partir de novos testes de bombeamento.

Desta forma, sugere-se, para uma melhor avaliação, que um maior número de poços seja incorporado ao modelo, especialmente por conta das elevadas heterogeneidades e anisotropias.

Independentemente, os resultados desse trabalho preenchem um espaço no conhecimento hidrogeológico do aquífero cárstico Salitre na BUU. Permitindo as entidades gestoras, perfuradores de poços e demais interessados, ter em mãos uma ferramenta pioneira fundamental na tomada de decisão em relação ao uso e ocupação da superfície e à gestão de recursos hídricos.

A metodologia aplicada para o mapa de IC (Índice de Carstificação), mostrou-se

validada para a BUU. O IC resultante, como mapa previsionar, mostrou-se favorável para a identificação das estruturas do exocarste e para exibir a densidade de estruturas cársticas e estruturas lineares.

O IC foi diferencial na determinação do fator C do método COP de vulnerabilidade. Os dados de solo da área fator O não foram ricos o suficiente para zonear no método. E o fator P foi considerado o de menor sensibilidade, por conta da distribuição das estações pluviométricas na BUU.

O método PI apresentou-se menos aceitável em seus resultados por ser mais generalista na inserção dos dados.

Portanto, o mapa de vulnerabilidade COP exibiu respostas mais sensíveis e mostrou que algumas áreas na BUU, de vulnerabilidade moderada a muito alta, devem receber atenção especial e, se for o caso, serem protegidas pelo poder público por se tratar de áreas que colocam em risco de contaminação o aquífero Salitre.

Assim, o uso e ocupação do solo na BUU pode ser direcionado com base na cartografia de vulnerabilidade à contaminação obida pelo método COP.

De acordo com a comparação entre transmissividade (T) e vulnerabilidade dos métodos PI e COP, foi verificado que o cruzamento do PI com T exibiu mais áreas com risco, enquanto que o do COP com T, exibiu menos áreas, porém com maior confiabilidade.

Os mapas de vulnerabilidade podem ser utilizados para auxiliar no zoneamento das áreas de proteção, especialmente as permanentes (APP), no que concerne à preservação dos recursos hídricos e estabilidade geológica do carste, e assim proteger as áreas de maior risco à contaminação.

Por fim, outros estudos de avaliação de risco e vulnerabilidade podem ser associados a esses resultados, aproveitando as porções mais vulneráveis já classificadas para aplicar mapeamentos em maior detalhe e alicerçar a gestão territorial e de águas.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, M. D.; LINI, A.; BIERMAN, P. R. $\delta^{18}\text{O}$, D and 2H measurements constrain groundwater recharge patterns in an upland fractured bedrock aquifer, Vermont, USA. *Journal of Hydrology*. 2000, 228 (1-2): 101-112.

ALBINET, M. & MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Orleans, France, Bull. BRGM, 2eme serie, section 3, n. 4, 1970, p. 13-22.

ALKMIM, F.F. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R. & BRITO-NEVES, B.B. (Orgs.), *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, 2004, p. 17-35.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEER, J.; PETTY, J. Y HACKET, G. DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using. Hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. 1987, 455 p.

ANDREO, B.; LINAN, C.; CARRASCO, F.; JIMÉNEZ DE CISNEROS, C.; CABALLERO, F.; MUDRY, J. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (^{18}O and 2H) of water in mountainous areas: application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain). *Appl Geochem* 2004, 19:561–574.

ANDREO, B.; VÍAS, J. M.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMENÉZ, P. Ensayo metodológico para la protección de aguas subterráneas em acuíferos carbonatados. Aplicación al sistema de Torremolinos. Jornadas sob presente y futuro Del água subterránea em España y La Directiva Marco Europea. Zaragoza (Spain). IAH-Spanish Chapter. 2002, 147-153.

ANDREO, B. Cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. En: Fernández, L.; Fernández, J. A. y López-Geta, J. A. (Eds.), *Protección de las aguas subterráneas frente a vertidos directos e indirectos*. 2004, p. 55-78.

ANDREO, B.; GOLDSCHIEDER, N.; VADILLO, I.; VÍAS, J. M.; NEUKUM, C.; SINREICH, M.; JIMÉNEZ, P.; BRECHENMACHER, J.; CARRASCO, F.; HÖTZL, H.; PERLES, M. J.; ZWAHLEN, F. Karst groundwater protection: first application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Lívar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*. 2006, 357(1-3): 54-73.

AQUILINA, L.; LADOUCHE, B.; DORFLIGER, N. Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. *Applied Geochemistry*. 2005, 20 (12): 2189-2206.

ARAGUÁS, L.A.; GONFIANTINI, R. – “Environmental isotopes in sea water intrusion studies”. Relatório interno da International Atomic Energy Agency. 1989.

ARAÚJO, S.M.S. A Região Semiárida do Nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. *Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE*, n. 5, p. 89-98, 2011.

ARAVENA, R. Application of environmental isotopes to the Guarani Aquifer System. Conferências Especiais, V Simpósio Sul Americano de Geologia Isotópica, VSSAGI, Punta de Leste, Uruguai. 2006.

ASTER-GDEM - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2). 2011.

BAKALOWICZ, M. La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement, Hydrogéologie, v. 4, p. 3-21, 1995.

BALDI, E.; GUASTALDI, E.; ROSSETO, R. Evaluation of intrinsic groundwater vulnerability to pollution: COP method for pilot área of Carrara hydrogeological system (Northern Tuscany, Italy). General Assembly 2009. European Geosciences Union, Vienna. Vol. 11, EGU2009-10405-2.

BARBALHO, M.G.S.; DE CAMPOS, A. Vulnerabilidade natural dos solos e águas do estado de Goiás à contaminação por vinhaça utilizada na fertirrigação da cultura de cana-de-açúcar. Boletim Goiano de Geografia, v. 30, n. 1, p. 155-170, 2010. DOI 10.5216/bgg.V30i1.11202.

BARBIERI, M.; BOSCHETTI, T.; PETITTA, M.; TALLINI, M. Stable isotope (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). Applied Geochemistry. 2005, 20 (11): 2062-2081.

BARRETO, F. S. Avaliação da qualidade e análise de risco de contaminação da água subterrânea utilizada para fins de abastecimento humano na região de Irecê/BA. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 2006, 117p.

BASTOS LEAL, L. R.; SILVA, H. P. da. (Coord.) 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 de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 2004, 435p.

BERALDO, V. J. Estudo isotópico ($\delta 2\text{H}$ e $\delta 18\text{O}$) e hidroquímica na região de Irecê, Bahia: contribuição ao entendimento do ciclo hidrológico regional. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Meio Ambiente. Salvador, Bahia. 2005, 84p.

BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. DOS. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. V. I e II. Editora da UFSC, Florianópolis, 1996.

BLAVOUX, B; DRAY, M.; FEHRI, A.; OLIVE, P.; GRONING, M; SONNTAG, C.; HAUQUIN, J.-P.; PELISSIER, G.; POUCHAN, P. – Palaeoclimatic and hydrodynamic approach to the Aquitaine basin deep aquifer (France) by means of environmental isotopes and noble gases. In Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in Hydrosphere. I.A.E.A. Vienna, 1993, p. 293-305.

BOEGLI. 1980. in: GERRA & CUNHA. Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e

Conceitos. Editora Bertrand Brasil. Rio de Janeiro. 1994, p. 309-334.

BOMFIM, L. F. & PEDREIRA, A. J. Geologia da Chapada Diamantina Oriental, Bahia (Folha Lençóis). In: BOMFIM, L.F. & PEDREIRA, A.J., Organizadores, - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Lençóis (Folha SD.24-V-A-V) Estado da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM, 1990, p.25-73.

BRANNER, J. C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. Bull. Geological Society of America. 1911, (22):187-206.

BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. 1981. Geologia. In: PROJETO RADAMBRASIL. Folha SD.24, Salvador. Rio de Janeiro, MME/Secretaria Geral. Levantamento de Recursos Naturais, v.24. p.25-192.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria 2914 de 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria 5 de 28 de Setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA nº 357. Resolução 357, de 17 de Março de 2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011. Dispõe sobre a Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://conama.gov.br>. Acesso em: 18 mar. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA nº 396. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da União nº 66, Brasília, DF, s. 1, p. 64-68, 7 abr. 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

BRETZ, J.H. Vadose and phreatic features of limestone caves. Journal of Geology, 50(6). 1942, 675-811.

BRIGGS, J.C.; FICKE, J.F. Quality of rivers of the United States. Based on the National Stream Quality Accounting Network (NASQAN): U.S. Geological Survey Open-File Report 78-200. 1977, 436 p.

CAMARUGY, B.E. Uso da Hidroquímica e Isótopos Estáveis ($\Delta E \Delta 18o$) no Estudo da Qualidade e Origem das Águas Subterrâneas do Aquífero Cárstico da Região Oeste do Estado da Bahia. Monografia. Universidade Federal da Bahia. 2009, 66p.

CAMPOS, M.M. Levantamento preliminar de teores de trítio em águas do Nordeste brasileiro. Relatório do IPR, Belo Horizonte. 1971, 10p.

CAPO, R. C.; STEWART, B. W.; CHADWICK, O. A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: teory and methods. Geoderma. 1998, 82(1-3):197-225.

CARRASCO, F.; ANDREO, B.; LINÁN, C.; MUDRY, J. Contribution of stable isotopes to the understanding of the unsaturated zone of a carbonate aquifer (Nerja Cave, Southern Spain). *C.R. Geoscience*, 338. 2006, 1203-1212.

CARREIRA, P.M.M. Paleoáguas de Aveiro. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro. 1998, 377 p.

CASSETI, V. Geomorfologia. Fundação de Apoio à Pesquisa – FUNAPE/UFG, 2006. Disponível em: Acesso em: 15 mai. 2015.

CECAV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Available in www.icmbio.gov.br/cecav. Acesso em 09/02/2017.

CERB. Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia. Fichas de dados dos poços da região da Bacia Uma-Utinga. 1975 a 2013.

CERQUEIRA, F.C. Hidroquímica e vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no município de São João da Barra, RJ. Dissertação de Mestrado apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. 2014.

CHARALAMPIDES, G.; MANOLIADIS, O. Sr and Pb isotopes as environmental indicators in environmental studies. *Environmental International*. 2002, (28):147-151.

CHRISTOFOLLETTI, A. Aplicabilidade do conceito geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. P 415-440.

CIVITA, M. Le carte di vulnerabilit`a degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica, quaderni di tecniche di protezione ambientale. Pitagora ed. 1994, 326 p.

CLARK I. D. & FRITZ P. (eds.) *Environmental isotopes in hydrogeology*. New York, Lewis Publishers, 1997, 328 p.

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, 1998, p. 1325.

COPLIN, T. B.; KENDALL, C.; HOPPLE, J. Comparison of stable references sample, *Nature*, v. 302, 1983, p. 236-238.

COSTA FILHO, W.D.; SANTIAGO, M.M.F.; COSTA, W.D.; MENDES FILHO, J. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrânea, 1998, 09 p.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil & DNPM-Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha Lençóis - SD.24-V-A-V - Texto Explicativo. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, 1990.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado da Bahia – 1: 1 000 000 -

Vetor – 2003.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Mapa Tectônico da América do Sul - 1: 5 000 000 - Vetor – 2016.

CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961. 133 p.

CUNHA, M. P. da. Interação água/rocha mineralizada em Fe, Pb, Zn e Ba, na porção Sul da bacia sedimentar de Irecê, Bahia, Brasil: Uma abordagem experimental. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia Instituto de Geociências, 2018, 194p.

DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW, D.; DUNN, E. S.; GOLDSCHNEIDER, N.; NEALE, S.; POPESCU, C.; ZWHALEN, F. Main concepts of the “European Approach” for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeol J* 10(2):340–345. 2002.

DANSGAARD, W. Stable isotopic in Precipitation, *Tellus*, 1964, 16:436_468.

DARLING, W. G.; BATH A. H. A stable isotope study of recharge processes in the English chalk. *Journal of Hydrology*. 1998, (101):31-46.

DE JESUS, T.C. Vulnerabilidade do aquífero cárstico Bambuí, bacia hidrográfica do Baixo rio Corrente, Oeste da Bahia: Ferramenta de gestão de recursos hídricos e ocupação territorial. Monografia. Universidade Federal da Bahia, 2018, 76p.

DE WIEST, R.J.M. *Geohydrology*. John Wiley, New York. 1965.

DERBY, O.A. Lavras Diamantinas. *Rev. Inst. Geogr. e Hist. da Bahia*, 1905, 11:143-153.

DIAS, F.S. Estudo do aquífero carbonático da cidade de Barroso, (MG) - Uma Contribuição à Gestão do Manancial subterrâneo. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais Instituto de Geociências, 2009, 94p.

DOCTOR, D.H.; ALEXANDER, E.C.; PETRIČ, M.; KOGOVŠEK, J.; URBANC, J.; LOJEN, S.; STICHLER, W. Quantification of karst aquifer discharge components during storm events through end-member mixing analysis using natural chemistry and stable isotopes as tracers. *Hydrogeol*, 2006, J 14(7):1171–1191. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0031-6>

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Günay, G.; Jonshon, A.I. (Ed). *International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts*. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 1997, 117–123.

DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas do Cráton do São Francisco: uma abordagem do ponto de vista da análise de bacias. In: DOMINGUEZ, J. M. L. & MISI, A. (eds.), *O Cráton do São Francisco, SBG, BA-SE/SGM/CNPq*, Salvador, BA, Brasil, p. 137-159, 1993.

DOMINGUEZ, J. M. L. As coberturas plataformais do proterozóico médio superior. In: BARBOSA, J.S.F. & DOMINGUEZ, J. M. L. (eds.) *Geologia da Bahia, Texto Explicativo para o Mapa Geológico do Estado da Bahia ao milionésimo*. SICM/SGM, Salvador, BA,

Brazil, p. 103-125, 1996.

DUARTE, Y.A., BAUTISTA, F., MENDOZA, M.E. Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Aduíferos Kàrsticos - Tropical and Subtropical Agroecosystems, 16 (2013): p 243 – 263.

EAGON, H. B. JR.; JOHE, D. E. Practical solutions for pumping tests in carbonate-rock aquifers: *Ground Water*, v. 10,no.4, 1972, p.6-13.

EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from capacity data in fractured rock aquifer. *Environmental Geology*, vol. 23, n°1, p.73-80, 1994.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBICS. 3 ed. Brasília, 2013.

EPSTEIN, S. e MAYEDA, T. Variations of 18O content of waters from natural sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, 4:213_221.

FABBRI, P. Transmissivity in the Geothermal Euganean Basin: A Geoestistical Analysis. *Ground Water*, Vol. 35, N° 5, 1997.

FAURE, G. Principles of isotope geology. 2. ed. New York, 1986, 589 p.

FAURE, G.; MENSING, T. M. Isotopes: principles and applications. John Wiley & Sons. Ed. 2005, 897p.

FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO.J.G.A. Hidrogeologia Conceitos e aplicações, 3ª edição Revisão ampliada.Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 835 p, 2008.

FERREIRA DE MELO, F.A.; REBOUÇAS, A.C.; GAT, J.R. & MAZOR, E. 1969. Preliminary Isotope survey of water sources in Northeastern Brazil. SUDENE, Spec. Report 18p.

FORD, D.; WILLIAMS, P. Karst Geomorphology and Hydrology. London, Unwin Hyman: 1989.

FORD, D.; WILLIAMS, P.D. Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester: Wiley, 2007, 562 p.

FORD, D.C. Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis- Transactions of the Cave Research Group of Great Britain, 1971, 13, 81–94.

FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En: Van Duijvenbooden, W. Y, 1987.

FOSTER, S. S. D., HIRATA, R. C. A. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes. CEPIS. 1991, 81p.

FOSTER, S. S. D., HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk evaluation: a survey

manual using available data. 2ed. LIMA: Pan American Sanitary Engineering and Environmental Science Center. (CEPIS/PAHO/WHO). 1988, 91p.

FRANTZ, L. C. Avaliação do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero Guarani no Perímetro Urbano da Cidade de Santana do Livramento – RS. Santa Maria/RS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSM, Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 2005, 125p.

FREITAS, P, M, C. Estudo de intercomunicação hidráulica superficial –subterrânea no carste da área Periurbana de Pains/MG, utilizando-se traçador rodamina wt. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais Instituto de Geociências Programa de Pós-graduação em Geologia, Belo Horizonte-MG.2009.

FRIEDMAN, I. Deuterium content of natural waters and others substances, *Geoquímica et Cosmochimica*, 1953, 4:89_103.

FRITZ, P. & FONTES, J. Ch. (eds.) Handbook of environmental isotope geochemistry. Elsevier, Amsterdam. 1980, 322 p.

FROST, C. D.; TONER, R. N. Strontium isotopic identification of water-rock interaction and ground water mixing. *Ground-Water*. 2004, 42(3):418-432.

GALVÃO, P. H. F. Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 124p., 2015.

GASSER, R.S. Vulnerabilidade e hidroquímica do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. Universidade Federal da Bahia Instituto de Geociências, 2017, 114 p.

GASSER,R.S.; CRUZ,J.M.; GONÇALCES, M.V.P. Avaliação da vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Carfanaum, Bahia. *Revista Águas Subterrâneas*, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – Estudo de Caso e Notas Técnicas, 2018.

GASSER. R, S. CRUZ.M.J.M. Avaliação da vulnerabilidade intrínseca a contaminação do aquífero cárstico Salitre no município de Cafarnaum, Bahia. *Revista águas Subterrâneas*, v. 32, n. 1, p. 70-78, 2018.

GAT, J.R.; MAZOR, E. & MERCADO, A. Aplicações potenciais de técnicas isotópicas e geoquímicas aos problemas hidrológicos do Nordeste brasileiro. Relatório à Comissão de Energia Atômica e à SUDENE. 1968, 28p.

GIBBS, R. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, Washington, 1970, v. 170, n. 3962, p. 1088-1090.

GIBSON, J.J.; PROWSE, T.D.; PIETRONIRO, A.; WASSENAAR, L; KOEHLER, G.– Isotope tracing of water balance and climatic variability along the Mackenzie river. In *Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management*. IAEA-CN-104, 2003, p. 65-69.

- GOLDSCHIEDER N.; POPESCU I. C. The European approach. In: Zwahlen F (ed) Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report COST Action 620. European Commission Directorate-General for Research, EUR. 2004, 20912:17–21
- GOLDSCHIEDER, N. Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and Swabian Alb. Ph.D. Thesis, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Karlsruhe. 236p. 2002.
- GOLDSCHIEDER, N. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. Hydrogeology Journal, 13:555–564, 2005. DOI 10.1007/s10040-003-0291-3.
- GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE, M.; STURM, S.; HOTZL, H.; The PI method—a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Z Angew Geol, v. 46, n.3, p. 157-166, 2000.
- GONÇALVES, M. V. P. Flúor nas águas subterrâneas do aquífero Bambuí no sudoeste da Bahia (Brasil). Tese (Doutorado em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2014.
- GONÇALVES, T.S. LEAL, L.R.B. Abordagem Empírica da Transmissividade na Estimativa da Produtividade em Aquíferos Não Granulares. XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2017.
- GONÇALVES, T.S. Modelos quantitativos para estimativa da transmissividade no aquífero Salitre na região de Irecê – Ba, Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2017, 78p.
- GUARESCHI, V. D. Feições de carste sobre a formação serra geral no município de São Martinho da Serra – RS. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Santa Maria Ciências Naturais e Exatas Programa de Pós-Graduação em Geografia e Geociências. 2012.
- GUERRA, A. M. Processos de Carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê- Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1986, 132 p.
- GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B. (org.) Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. (p.149-209). 1994. 345p.
- GUIMARÃES, J. T.; SANTOS, R. A.M., Roberto Campelo de (Org.) Geologia da Chapada Diamantina Ocidental (Projeto Ibitiara Rio de Contas). Salvador: CBPM. 2008. 64 p. il. (Série Arquivos Abertos, 31). (Para a chapada Diamantina).
- GUIMARÃES, J.T.; PEDREIRA, A.J. Estratigrafia. In: GUIMARÃES, J.T.; PEDREIRA, A.J., (coords.), Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Utinga, Estado da Bahia, DNPM/CPRM, 1990, p. 70-82.
- GUNN, J. (ed.) Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn, New York, 902

pp. 2004.

HAMM, S. Y.; CHEONG, J. Y.; JANG, S.; JUNG, C. Y.; KIM, B. S. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, 310, pg 111 - 121, 2005.

HIRATA, R. C. A., FERNANDES, A. Monitoramento das águas subterrâneas: um grande desafio para países emergentes. *Anais: I Simpósio Latino-Americano de Monitoramento das Águas Subterrâneas*. Belo Horizonte, 2006.

HIRATA, R. C. A., REBOUÇAS, A. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada em perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*. 110-4. 1999, p.423-436.

HIRATA, R. C. A.; FERNANDES, A. Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación antrópica. In: Carlos Diaz-Delgado; Maria Vicenta Esteller; Fernando Lopez-Vera. (Org.). *Recursos hídricos - Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. 1 ed. Uruguay: Piriguazú Ediciones. 2005, v.1, p.443-454.

HIRATA, R. Oito perguntas e oito tentativas de resposta sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos. *Seminário-Traller, 1. Protección de Acuíferos Frente a La Contaminacion: Metodologia*. Toluca, México, jun. 2001.s

HOEFS, J. *Stable isotope geochemistry*. Springer Verlag Berlim-New york, 1973

HUDDART, P. A.; LONGSTAFFE, F. J.; CROWE, A. S. δD and $\delta 18O$ evidence for inputs to groundwater at a wetland coastal boundary in the southern Great Lakes region of Canada. *Journal of Hydrology*. 1999, 214(1-4):18-31.

IAEA. International Atomic Energy Agency. *Instrumentation and control systems important to safety in nuclear power plants: safety guide*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Manual técnico de geomorfologia, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais*. – 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências, ISSN 0103-9598; n. 5).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cartas Planialtimétricas – 1: 250 000 – Vetor – 2015 – IBGE*.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. *Balanco hídrico e dados climatológicos*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/agro.html>. 2008. Acesso em 31.01.2014.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. Estação Operante Lençóis – BA, de 2000 a 2014*. Disponível em www.inmet.gov.br. Acesso 18 de dezembro de 2014. Brasília-DF.

INEMA. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado Da Bahia. *Mapa de Vegetação e Unidades de Conservação – Estado da Bahia – 1:1 350 000 – Vetor – 2014*.

INEMA. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado Da Bahia. Mapa de Regiões de Planejamento e Gestão das Águas – RPGA e Solos – Estado da Bahia– 1: 1 250 000 – Vetor – 2014.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied Geostatistics. New York: Oxford University Press, 561p. 1989.

JALLUDIN, M., RAZACK, M. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). Hydrogeology Journal, 12, 159–170, 2004.

JONES, W. K.; HOBBS, H. H. III; WICKS, C. M.; CURRIE, R. R.; HOSE, L. D.; KERBO, R. C.; GOODBAR, J. R. TROUT, J. Recommendations and guidelines for managing caves on protected lands. Charles Town: Karst Waters Institute, 2003. (Special Publication 8)

KARMANN, I. Carste e cavernas no Brasil: Distribuição, dinâmica atual e registros sedimentares, breve histórico e análises crítica das pesquisas realizadas no âmbito do IGC USP, 62p. Tese de Doutorado, 2016

KEHEW, A. E. Applied chemical hydrogeology. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 2001, 368p.

KENDALL, C.; DOCTOR, D. H. Stable isotope applications in hydrologic studies. In: Drever, J. I. (ed.) Surface and ground water, weathering, and solis. Holland, H. D. & Turekian, K. K. (org.) Treatise on Geochemistry, V. 5. 2003, p.319-364.

KIM, Y.; KIM, J. Y.; KIM, K. Geochemical characteristics of fluoride in groundwater of Gimcheon, Korea: lithogenic and agricultural origins. Environmental Earth Sciences, v. 63, n. 5, p. 1139-1148, 2011.

KOHLER, H. C. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 309 - 334

KRAUSKOPF, K. B. Introdução à Geoquímica. I vol. São Paulo: EDUSP, 1972. [Trad. Michal Lando e Paulo S. C. Bogus].

LAMBÉN, L. J.; JÓDAR, J.; CUSTODIO, E.; SOLER, A.; SAPRIZA, G.; SOTO, R. Isotopic and hydrogeochemical characterization of high-altitude karst aquifers in complex geological settings. The Ordesa and Monte Perdido National Park (Northern Spain) case study. Science of the Total Environment, Elsevier, Science of the Total Environment 506–507 (2015) 466–479, journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv, 14 p

LLADÓ, N. L. Fundamentos de Hidrologia Cárstica (Introducion a Geoespeleologia). Editora Blume. Rosário, Madri, 1970, 548 p

LOUREIRO, H. S. C.; LIMA, E. S.; MACEDO, E. P.; SILVEIRA, F. V.; BAHIENSE, I. C.; ARCANJO, J. B. A.; MORAES FILHO, J. C.; NEVES, J. P.; GUIMARÃES, J. T.; TEIXEIRA, L. R.; ABRAM, M. B.; SANTOS, R. A.; MELO, R. C. Geologia e recursos minerais da parte Norte do Corredor do Paramirim (Projeto Barra-Oliveira dos Brejinhos).

Salvador: CBPM/ CPRM, 2009. 122 p. (Série arquivos abertos, 33).

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Estudo isotópico em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídio ao modelo conceitual de fluxo. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(2) 355-365, 2011. *Arquivo digital disponível on-line no site www.sbgeo.org.br*

MACE, R. E. Determination of transmissivity from specific capacity tests in karst aquifer. *Ground Water*, v. 35, n 5- september-october-1997.

MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific data. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin. Austin, Texas, v. 01, p. 01-44, 2001.

MACEDO, M. H. F.; BONHOME, M. G. Contribuição à cronoestratigrafia das Formações Caboclo, Bebedouro e Salitre da Chapada Diamantina (Ba), pelos métodos Rb-Sr e K-Ar. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Vol. 14, n.3. 1984, p.153-163.

MANGIN, A. Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifers karstiques. Thèse, Institut des Sciences de la Terre de l'Université de Dijon. 1975.

MARGAT, J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine á la pollution. Bases de la cartographie. Doc. BRGM, 68 SGL 198 HYD, 1968.

MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B.; OMETTO, J. P. H. B.; FERRAZ, E. S. B.; VICTORIA, R. L.; MOREIRA, M. Z. Desvendando Questões Ambientais com Isótopos Estáveis. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144 p

MESTRINHO, S. S. P. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (Org.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3ed. Rev. e ampl.. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 2008, p.673-685.

MINGOTI, R.; SPADOTTO, C.A.; MORAES, D.A.C. Suscetibilidade à contaminação da água subterrânea em função de propriedades dos solos no Cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51(9):1252-1260, 2016. DOI10.1590/S0100-204X2016000900025

MISI, A. O Grupo Bambuí no estado da Bahia. In: INDA, H. A. V. (Ed.) *Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: textos básicos*. Salvador: CPM, vol. 1. 1979, p.119-154.

MISI, A.; SILVA, M. G. Chapada Diamantina Oriental - Bahia: Geologia e Depósitos. Salvador: Secretária da Indústria, Comércio e Mineração/superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1994.

MISI, A.; SILVA, M.G. Chapada Diamantina Oriental - Bahia: Geologia e Depósitos. Salvador: SGM, 194 p., 1996. (Série de Roteiros Geológicos)

MOOK, W. G. e VRIES, J. J. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*, vol. 1, International Agency of Atomic Energy, 2001.

MORAES FILHO, O.; LEAL, R.A.; MORAES, L.C.; Projeto Nova Redenção chumbo de Nova Redenção Estado da Bahia, CPRM, 2001,36p.

MOSER, H. Trends in isotope hydrology. In: *Intramerican Symposium on Isotope Hydrology*. Bogotá, Colombia, p 3-21, 1980.

MUSTAFA, S.; LAWSON, J. S. Review Tertiary Gambier Limestone aquifer properties, lower South-East, South Australia. The Department of Water, Land e Biodiversity Conservation. Report, DWLBC 2002/24.

NEGRÃO, F. I. Caracterização hidrogeoquímica e vulnerabilidade do sistema hidrogeológico cárstico da região de Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 1987, 86p.

NEVES, B. B. de B.; CORDANI, U. G.; TORQUATO, J. R. Evolução geocronológica do Pre-cambriano do estado da Bahia. In: INDA, H. A. V., DUARTE, F. (Ed) *Geologia e recursos minerais do estado da Bahia: textos básicos*. Salvador: COM, vol. 3. 1980, 101 p.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. AZEVEDO, E.G. Utilização de análises hidroquímicas e da metodologia COP para determinação da vulnerabilidade do aquífero cárstico salitre na região de Irecê-Ba. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Bonito, MS, 2012.

NOSSA, T.C.B. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Salvador, 2011. 252 p.

NOSSA, T. C. B.; BASTOS LEAL, L. R.; ZUCHI, M. R. Hidroquímica e índices de saturação dos minerais do sistema aquífero cárstico Salitre na região de Irecê- Lapão, Bahia, Brasil. Anais: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, São Paulo, 2011.

NRC. National Research Council. Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty. Washington, D.C. National Academy Press, 1993.

OJAMBO, S. B.; LYONS, W.B.; WELCH, K. A.; POREDA, R. J.; JOHANNESSON, K. H. Strontium isotopes and rare earth elements as tracers of groundwater-lake water interactions, Lake Naivasha, Kenya. *Applied Geochemistry*. 2003, 18(11): 1789-1805.

PALMER, A.N. Distinction Between Epigenic and Hypogenic maze Caves. *Geomorphology*, n 134, p. 9–22. 2011.

PEDREIRA, A.J. & MARGALHO, R.S.F.X. 1990. Geologia da Chapada Diamantina Oriental, Bahia (Folha Mucugê). In: PEDREIRA, A.J. & MARGALHO, R.S.F.X.; Orgs., Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Mucugê (Folha SD.24-V-C-II), Estado da Bahia; Texto Explicativo. Brasília; DNPM/CPRM, p.19-68.

PEDREIRA, A.J. ROCHA, A.J.D. COSTA, I.V.G. MORAIS FILHO, J.C. 1987. Bacia de Irecê II: Relatório Final. CPRM.

PEDREIRA, A.J.C.L. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica. São Paulo, 1994. (Tese de Doutorado).

126 f. USP, 1994.

PHILLIPS, D. L.; GREGG, J. W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*. 2003, (136):261-269.

PILLA, G.; SACCHI, E.; ZUPPI, G.M.; CIANCETTI, G.; BRAGA, G.– Hydrochemistry and isotope geochemistry as management tools for groundwater resources in multiplayer aquifers: a study case from the Po Plain (Lomellina, south-western Lombardy, Italy). In *Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management*. IAEA-CN-104, 2003, p. 168-169.

PILO, L.B. Geomorfologia Cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S.I.]: vol. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions American Geophysical Union*: Washington, v. 25, p. 911-923, 1944.

PLUMMER, L.N. Stable isotope enrichment in paleowaters of the southeast Atlantic coastal plain, United States. *Science*, Vol. 262, 1993, p. 2016-2020.

POLEMIO, M. D., CASARANO, D.LIMONI, P. P. Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* v.9, p. 1461-1470, 2009.

PRADO, E. B. & BEDMAR, A. P. Aportación de diversas técnicas isotópicas al estudio hidrogeológico de la cuenca de Maranhão (Brasil). *Hidrologia*, 1976, abril-julho: 65-79.

RADULOVIC´ ,M.M., STEVANOVIC´ Z, RADULOVIC´ . M. A new approach in assessing recharge of highly karstified terrains–Montenegro case studies. *Environ Earth Sci.* 2012, 65(8):2221–2230

RAVBAR, N.; KRANJC, A. The protection of Karst waters: a comprehensive slovene approach to vulnerability and contamination risk mapping. *Institut zaraziskovanja krasa ZRC SAZU*, 2007.

RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *J Hydrol* 2007, 325(1–4):164–178

RAZACK M.; LASM T. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325 (2004), p 164 - 178.

RAZACK, M., HUNTLEY, D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer: *Ground Water*, 1991,v. 29, no. 6, p. 856-861

REDWAN, M., MONEIM, A. A. A., AMRA, M. A. Effect of water–rock interaction processes on the hydrogeochemistry of groundwater west of Sohag area, Egypt. *Arab J Geosci* 9: 111, 2016.

ROSS, J. L.S. Ecogeografia do Brasil: Subsídios para planejamento ambiental. 1ª ed. Editora Oficina de Textos, São Paulo 2006.

ROSS, J. L.S. Geomorfologia: Ambiente e Planejamento. São Paulo: Contexto, 1990. 85p

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. In: Swart, P. K. et al. (ed.). Climate change in continental isotopic records, Geophysical Monograph Series, 78, AGU, Washington, DC, 1993.p. 1-3.

RUSSO, A. S. Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística – UGRHI – PCJ. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009, 75p.

SALATI, E.; GUSMÃO, G.; MATSUI, E. e CERVELLINI, A. Estudo preliminar das concentrações de ^{18}O e D em águas do Nordeste Brasileiro. Boletim Científico do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, São Paulo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba. 1971.

SALATI, E.; LEAL, J.M. & CAMPOS, M.M. Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrogeológico do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE. Série Hidrogeologia, 1979, nº 58. 55p.

SALLES, L.Q. Hidrologia e risco geológico em rochas carbonáticas proterozoicas: porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, 2017, 87 p.

SALLES, L.Q. LEAL, L.R.B, PEREIRA, R.G.F.A, LAUREANO. F.V, GONÇALVES, T.S. Influência dos aspectos hidrogeológicos de aquíferos cársticos na evolução do relevo: porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo, v. 19, nº 1 (2018), 93-106

SAMPAIO, A. R. (Org). Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB Jacobina – Folha SC 24-y-C, Estado da Bahia. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.

SANCHES, A.L.; MISA, A.; KAUFMAN, A.; AZMY, K; As sucessões carbonáticas neoproterozóicas do Craton do São Francisco e os depósitos de fosfato: correlações e fosfogênese. Revista Brasileira de Geociências, 2007, v37, n 04 (suplemento), p182-194.

SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H.; SILVA, C. M. S. V. Métodos isotópicos. In: Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. Feitosa, A.C. et al. (Org.). 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. 812 p.

SANTOS, C. P. L. Análise dos processos de salinização das águas subterrâneas da bacia do rio Salitre por meio de traçadores ambientais. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Curso de Pós-graduação em Geofísica, 2008, 128 p.

SANTOS, H. M. Sistema de informações geográficas do aquífero cárstico da micro-região de Irecê, Bahia: Subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos das bacias dos rios Verde e Jacaré. 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências,

Universidade Federal da Bahia, Bahia.

SANTOS, R. A. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do município de Iraquara, Bahia. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia. 2011. 144 p.

SANTOS, R. A. Hidrogeoquímica dos domínios cársticos de Irecê, Bahia - Brasil. 2017. 97 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2017.

SANTOS, R.A. CRUZ, M. J. M. NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: Subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Cadernos de Geociências, nº 7. Universidade Federal da Bahia Instituto de Geociências, Instituto de Geociências, 2010.

SCOZZARI, A.; DOTSIKA, E. (Ed.). Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control. Springer, 2015.

SEI. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais do Estado Da Bahia. Mapa de Divisão Político-Administrativa do Estado da Bahia – 1: 100 000 – Vetor - 2017/06/14 – SEI.

ŞEN, Z. Applied Hydrogeology for Scientists and Engineers. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, 444 pp, 1995.

ŞEN, Z. Pratical and Applied Hydrogeology. ITU, Hydraulics Lab. Malask, Instabul, Turkey - First Edition, 2014.

SIDLE, W. C. Environmental isotopes for resolution of hydrology problems, Environ. Monitor. Assess., 1998, 52:389-410.

SILVA JÚNIOR, G. C.; CUSTODIO, E. Hidrogeoquímica e Isotopía Ambiental del Sector Noreste de la Serra de Tramuntana, Isla de Mallorca (España). Ingeniería del Agua, v. 17, p. 1-30, 2010.

SILVA M.G.; CUNHA J.C. Greenstone Belts and equivalent volcano-sedimentary sequences of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil, Brazil – Geology and Mineral Potential. In: Silva M.G. & Misi A. Base Metal deposits of Brazil. MME/CPRM/DNPM, Belo Horizonte, 1999, p. 92-99.

SILVA, A.B. 2002. Hidrogeologia de Meios Cársticos. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 39p, il.

SILVA, A.J.C.L.P.da O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: sedimentologia, estratigrafia e tectônica. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, 1994.186 páginas

SILVA, H. M. da. Sistema de informações geográficas do aquífero cárstico da microregião de Irecê, Bahia: subsídio para a gestão integrada dos recursos hídricos das bacias dos rios Verde e Jacaré. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. 2005, 145p.

SILVEIRA, C. S. SILVA JUNIOR. G.C. O uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos no Brasil: uma resenha crítica. Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, v 25, 2002.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R.P. Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. DOI 10.1007/987-90-481-8799-7_8, Springer Science + Business Media B.V. 2010.

SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic. A review of the source of behavior and distribution of arsenic in natural waters. in natural waters. Applied Geochemistry 17, 517-568. Applied Geochemistry 17. 2002, p.517-568.

SNISRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Portal HidroWeb. Disponível em: <www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf> Acessado em abril de 2019.

SOUZA, J.D.; MELO, R.C.; KOSIN, M. (Coords.). Mapa geológico do estado da Bahia. Versão 1.1. Salvador: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000.

SRIVASTAVA, N. K. Identificação de amostras de estromatólitos. Relatório de consultoria para CPRM/SUREG/SA, 1988.

SRIVASTAVA, N. K. Relatório preliminar sobre os estromatólitos da Formação Caboclo na região de Morro do Chapéu (Bahia). Relatório de consultoria para CPRM/SUREG/SA, 1989.

STEVANOVIĆ, Z. Professional Practice in Earth Sciences, Zoran Stevanovic. Karst Aquifers – Characterization and Engineering. Series editor James W. LaMoreaux, Tuscaloosa, AL, USA. 2015, 692p. Chapter xvi .More information about this series at <http://www.springer.com/series/11926>.

TALLINI, M.; FALCONE, R. A.; CARUCCI, V.; FALGIANE, A.; PARISSE, B.; PERTITA, M. Isotope hydrology and geochemical modeling: new insights into the recharge processes and water–rock interactions of a fissured carbonate aquifer (Gran Sasso, central Italy), Environ Earth Sci, 2014, 72:4957–4971 DOI 10.1007/s12665-014-3364-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 15 p

THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union Trans, 1935, vol. 16, p. 519-524.

TRAVASSOS, L. E. P. Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil / Luiz Eduardo Panisset Travassos. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010. Publicado em formato eletrônico. Disponível em: <www.tradicaoplanalto.com.br>. Originalmente apresentado como dissertação de mestrado, 2007 (Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais).

UAGODA, R. Reconhecimento geomorfológico de relevo cárstico em rochas quartzíticas: bacia hidrográfica do Ribeirão Santana, médio vale do rio Paraíba do Sul./ Dissertação de Mestrado, PPGG-UFRJ, Rio de Janeiro. 2006.

UREY, H. C.; LOWENSTAM, H. A.; EPSTEIN, S.; MCKINNEY Measurement of paleotemperatures and temperatures of the Upper Cretaceous of England, Denmark and the Southeastern United States. *Geological Society of America Bulletin*. 1951, (62):399-416

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 - USP/SP. 2004, 122 p.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer vulnerability index (AVI): A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Can Water Res J*. 1993, 18:25-37.

VERBOVSEK, T. Estimation of transmissivity and hydraulic conductivity from specific capacity and specific capacity index in dolomite aquifers. *Journal of Hydrology*, 2008, 13:817-823.

VESTENA, L. R.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste. *RA' EGA (UFPR)*, v. 4, n. 6, p. 81-94, 2002.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: CARRASCO, F. DURÁN, J. J. y ANDREO, B. (Eds.), *Karst and Environment*. 2002, p.75-83.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hidrogeology Journal*. 2006, 14(6):912-925.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMENEZ, P. The COP method. In: ZWALEN F., editor. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*, EUR20912. Brussels7 European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development. 2004, p.163-171.

VÍAS, J.; ANDREO.; B.; RAVBAR, N.; HOTZL H. (2010) Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *J Environ Manage* 91:1500-1510

VILANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B. L.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. M.; VILANUEVA, P. R. Aplicação do método cop para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação do aquífero cárstico salitre, Irecê-Ba, Brasil. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 2015, 19(1)

VILANUEVA, T. C. B.; LEAL, L. R. B. L.; ZUCHI, M. R.; AZEVEDO, A. E. G.; MIRANDA, J. G. M.; VILANUEVA, P. R. Avaliação isotópica e hidroquímica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. *Águas Subterrânea*, v. 28, nº2, 2014, p. 82-94.

VOGEL, M. M. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na região cultural da quarta colônia de imigração italiana, RS. Dissertação, Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Área de Concentração em Meio Ambiente e

Sociedade, da Universidade de Santa Maria - RS, 2008.138 páginas

VRBA J. The role of groundwater monitoring in the management of groundwater resources. I Simpósio Latino-Americano de Monitoramento de Águas Subterrâneas. Belo Horizonte - MG. 2006, 16p.

VRBA J.; SOBLSEK P. Groundwater monitoring. En Geology and Environment International Manual in three volumes. UNESCO. UNEP, 1988.

VRBA, J.; CIVITA, M. Assessment of groundwater vulnerability. En: Vrba, J. y Zaporozec, A. (Eds.), Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International contributions to hydrogeology. 1994, (16): 31-48.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A.; (eds) Guidebook on mapping groundwater vulnerability, 16th edn. International Contributions to Hydrogeology (IAH). 1994. Hannover.

WHO. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 3rd.V.1.Recommendations. Addendum. Geneva, 2003.

WHITE, W. B. Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York, Oxford University Press. 1988. 464p.

WHITE, W.M. Stable isotopes. In: Geochemistry. 1997, p. 370-420.

WILLIAMS A. E. Stable isotope tracers: natural and anthropogenic recharge, Orange County, California. Journal of Hydrology. 1997, 201(1-4):230-248.

WILLMANN, M., CARRERA, J., SÁNCHEZ-VILA, X., VÁZQUEZ-SUNÉ. On the meaning of the transmissivity values obtained from recovery tests. Hydrogeology, v.15, 2007.

YANG, Y; LERNER, D. N.; BARRET, M. H.; TELLAM, J. M. Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. Environmental Geology. 1999, 38(3):183-198.

ZUBLENA, J. P.; COOK, M. G.; ST CLAIR, M. B. Pollutants in groundwater: health effects. 2001. Disponível em: <http://ces.soil.ncsu.edu/soilscience/publications/soilfacts>. Acesso em: 10.08.2014

ZWAHLEN, F. (Ed.). Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers. Final report COST action 620. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development. Luxemburgo, 2003.