



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**INTERAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E
BAMBUÍ NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GO: INTEGRAÇÃO DE
DADOS GEOLÓGICOS, POTENCIOMÉTRICOS,
HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Nº 204**

MANUELA FREIRE GALVÃO

Orientador: Professor José Eloi Guimarães Campos

Brasília, Dezembro de 2022.



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

**INTERAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E
BAMBUÍ NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GO: INTEGRAÇÃO DE
DADOS GEOLÓGICOS, POTENCIOMÉTRICOS,
HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Nº 204**

MANUELA FREIRE GALVÃO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador)

Prof. Dr. Detlef Hans Gert Walde (Universidade de Brasília)

Prof. Dr. Luiz Antônio de Oliveira (Universidade Federal de Uberlândia)

Brasília, Dezembro de 2022.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com os dados fornecidos pela autora

Freire Galvão, Manuela

INTERAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E BAMBUÍ NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GO: INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS, POTENCIOMÉTRICOS, HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS / Manuela Freire Galvão;

orientador José Eloi Guimarães Campos - Brasília, 2022.

76 p.

1. Bacia hidrogeológica. 2. Interação entre sistemas aquíferos Urucuaia e Bambuí. 3. Área de proteção ambiental nascentes do Rio Vermelho.

Referência bibliográfica

Freire Galvão, M. Interação entre os Sistemas Aquíferos Urucuaia e Bambuí na região de Mambaí, GO: Integração de dados geológicos, potenciométricos, hidroquímicos e isotópicos. 2022. 76 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Cessão de direitos

NOME DO AUTOR: Manuela Freire Galvão

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Interação entre os Sistemas Aquíferos Urucuaia e Bambuí na região de Mambaí, GO: Integração de dados geológicos, potenciométricos, hidroquímicos e isotópicos.

Autorizo a Universidade de Brasília a reprodução parcial ou total desta dissertação de mestrado por meio eletrônico, impressão e/ou **download**, para fins de pesquisa e produção científica brasileira. Com obrigatoriedade de citação da obra.

Grau: Mestre Ano: 2022.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Instituto de Geociências

AGRADECIMENTOS

Pelo presente trabalho gostaria primeiramente de agradecer ao orientador professor José Eloi Guimarães Campos, que se revelou uma pessoa de imensa empatia e bondade singular, ao longo desses quase 3 anos de mestrado, longos, difíceis e desafiadores. Além de excelente geólogo, professor e orientador. Obrigada, Eloi.

Em segundo lugar agradeço a Universidade de Brasília e ao Instituto de Geociências, pela oportunidade, pelo apoio, e por terem sido minha casa por mais de 7 anos. Lugar onde me tornei quem sou, tanto como geóloga, quanto como ser humano. Além disso, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001. À Capes agradeço, pela concessão da bolsa de estudos, que proporcionou maior conforto e segurança a esse período tão difícil e desafiador.

Ao professor Dr. Jérémie Garnier pelas discussões, sugestões e auxílio. Ao Dr. Myller Tonhá pela condução das análises químicas realizadas. E ao Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília, por possibilitar que tais análises fossem possíveis, com qualidade e seriedade.

Ao professor Dr. Rogério Uagoda e ao CECAV/ICMBio, pela contribuição ao projeto de mestrado e pelo financiamento das análises isotópicas.

Ao colega de departamento e doutorando Lucas Teles pela indispensável ajuda em campo e pela disponibilidade. À amiga e doutoranda Tassiane Junqueira, pela paciência, auxílio, conversas e dúvidas sanadas ao longo dos meses. E à Ana Luiza Machado, que me ajudou muito com algumas ferramentas e elaborações de figuras, mapas, e afins.

À minha família pelo suporte e pelo apoio sempre. E em especial à minha mãe Márcia e minha irmã Carolina, por serem fonte inesgotável de afeto, cuidado e escuta. Ao meu tio Marcius, doutor e professor da UNICAMP, pelas sutis pressões, cobranças e incentivo em relação a este mestrado.

À Marília Freire, amiga que a geologia de Salvador me trouxe, doutoranda na Universidade de São Paulo, que me forneceu conselhos valiosos a respeito do processo de fechamento deste ciclo.

À amiga Luana Machado Campos, de escuta sempre atenta e gentil, pessoa que foi essencial nos dias mais difíceis dos últimos 3 anos. Amiga da Geologia para a vida.

À parceira e amiga Renata Veiga, que está presente nessa jornada comigo há mais tempo do que ambas imaginávamos, e que me deu muitas forças e apoio nessa reta final, cheia de desafios e dúvidas.

Por fim agradeço a mim mesma.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e Justificativa	1
1.2 Localização da Área de Estudo	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Materiais e Métodos	4
1.4.1 Levantamento Bibliográfico.....	4
1.4.2 Obtenção de Dados.....	5
1.4.3 Análises Laboratoriais.....	9
1.5 Fundamentação Teórica	10
1.5.1 Bacias Hidrogeológicas.....	10
1.5.2 Hidroquímica.....	11
1.5.3 Métodos Isotópicos.....	12
CAPÍTULO 2 - BACIAS HIDROGEOLÓGICAS: CONCEITOS E APLICAÇÕES.....	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. MATERIAIS E MÉTODOS	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
4. CONCLUSÕES.....	30
5. REFERÊNCIAS	30
CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.1 Contexto Geológico Regional e Local	33
3.1.1 Embasamento	33
3.1.2 Supergrupo Espinhaço	33
3.1.3 Supergrupo São Francisco	33
3.1.4 Grupo Santa Fé.....	35
3.1.5 Grupo Aerado	35
3.1.6 Grupo Mata da Corda.....	36
3.1.7 Grupo Urucuia.....	36
3.2 Pedologia.....	39
Neossolos	39
Cambissolos	40
Argissolos.....	40
Latossolos.....	42

Gleissolos	42
3.3 Geomorfologia	42
3.4 Clima	43
3.5 Hidrografia	43
3.6 Contexto Hidrogeológico	44
Sistema Aquífero Urucuia	44
Sistema Aquífero Bambuí	45
Aquífero Coluvionar.....	45
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 Resultados	47
4.1.1 Considerações Iniciais.....	47
4.1.2 Caracterização dos Aquíferos.....	50
4.1.3 Ensaio de Infiltração <i>in situ</i>	52
4.1.4 Hidroquímica e Parâmetros Físico-Químicos	53
4.1.5 Análises Isotópicas	58
4.2 Discussão.....	62
4.2.1 Modelo Conceitual do Fluxo Subterrâneo.....	64
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	72
5.1 Conclusões	72
5.2 Recomendações.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de localização da área de estudo, com destaque para a Área de Preservação Nascentes do Rio Vermelho, em vermelho. -----	3
Figura 1.2 Sonda Multiparâmetro da marca Hach utilizada nos trabalhos de campo para as medições <i>in situ</i> de pH, temperatura (°C), Eh e condutividade elétrica (µS/cm). -----	6
Figura 1.3 Aparelho portátil utilizado na filtração das amostras para análise hidroquímica, em campo. Na figura B da direita é mostrado o local onde se insere a membrana em ésteres de celulose descartável, com poros de 0,45µm. -----	6
Figura 1.4 Ilustração da realização de ensaio pelo método dos Anéis Concêntricos em diferentes tipos de solos observados na região de estudo. -----	7
Figura 1.5 Ilustração de campo durante realização de ensaio <i>Open end Hole</i> . Em ambos os casos estão representados os 4 furos necessários para cada ensaio, os quais foram realizados com escavadeira articulada e trado manual. -----	8
Figura 2.1 Ilustração esquemática demonstrando caso em que duas bacias hidrogeológicas são sobrepostas verticalmente por apresentarem sistemas de fluxo distintos, com um aquífero representado por camada de folhelho entre elas. -----	31
Figura 2.2 Ilustração esquemática demonstrando a influência que estruturas geológicas de grande porte exercem no estabelecimento de assimetrias entre os divisores hidrográficos e	

hidrogeológicos. -----	37
Figura 2.3 Assimetria em sistema cárstico com presença de sumidouros que representam zonas de maior condutividade hidráulica. A linha pontilhada em vermelho representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de Arraes e Campos (2007). -----	38
Figura 2.4 Caso em que há assimetria entre os limites hidrográficos e hidrogeológicos causada por presença de camada impermeável de folhelho sob um aquífero livre composto por arenito. A linha tracejada em azul representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de Arraes e Campos (2007). -----	38
Figura 2.5 Assimetria causada por acentuada quebra de relevo. Observar este caso, no qual uma mesma bacia hidrográfica comporta três bacias hidrogeológicas subjacentes. Modificado de Arraes & Campos (2007). -----	39
Figura 3.1 Coluna estratigráfica resumida da Bacia do São Francisco. (Retirado de Agnel 2012, coluna modificada de Alkmim, 2004). -----	16
Figura 3.2 Mapa geológico sobreposto a modelo digital de elevação confeccionado com dados de relevo sombreado. -----	19
Figura 3.3 Fotos de campo de afloramentos representativos das unidades da área. -----	20
Figura 3.4 Imagem de satélite obtida do sistema <i>GoogleEarth Pro</i> , com as sedes dos principais municípios destacados, além dos diferentes padrões de ocupação das terras. -----	21
Figura 3.5 Perfil de Neossolo Litólico desenvolvido sobre siltitos da Formação Lagoa do Jacaré. -----	22
Figura 3.6 Perfil de Cambissolo Háplico desenvolvido sobre siltitos da Formação Serra da Saudade. O horizonte B incipiente é rico em matéria orgânica e bastante estruturado. -----	33
Figura 3.7 Perfil de Argissolo Vermelho eutrófico, desenvolvido sobre calcários e margas da Formação Lagoa do Jacaré. A estruturação granular grossa é comum nos horizontes superficiais. A cerosidade é observável a olho nu, até os 60 cm do perfil. Os fragmentos de rocha carbonática representam a rochiosidade que é comumente observada nos solos podzolizados desta região. -----	24
Figura 3.8 Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, desenvolvido sobre arenitos da Formação Posse do Grupo Urucuaia. A estruturação é pouco desenvolvida, em um perfil com textura arenosa. -----	25
Figura 3.9 Gráfico do acumulado semanal da pluviosidade medida durante o ano de 2020, em estação automática. Valores de precipitação em mm. Estação: Posse (A017). Fonte: INMET. -----	26
Figura 3.10 Modelo esquemático dos subtipos de aquíferos presentes no Sistema Aquífero Urucuaia. Seção WE e NS integradas. O aquífero livre profundo é representado na seção leste-oeste (WE), pelo número IV. A superfície potenciométrica regional é representada pela linha contínua. Retirado de Gaspar & Campos (2006). -----	27
Figura 4.1 Mapa com representação das amostras de hidroquímica, de análise isotópica, e com os pontos onde foram realizados ensaios de infiltração na área. -----	50
Figura 4.2 Diagramas de classificação do tipo químico predominantes nas amostras de águas da região estudada. A - Primeira campanha de monitoramento (período seco); B - Segunda campanha de monitoramento (período chuvoso). -----	56
Figura 4.3 Análise isotópica das amostras da região de Mambai/GO e arredores. Eixo X: $\delta^{18}O$ (‰). Eixo Y: δD (‰). Linha tracejada em vermelho: reta meteórica global. -----	62
Figura 4.4 Bloco diagrama esquemático mostrando os diferentes sistemas de fluxo hidrogeológico. -----	66
Figura 4.5 Decomposição esquemática do ciclo hidrológico nos diferentes ambientes hidrogeológicos da região estudada. O tamanho das setas é proporcional ao desenvolvimento de cada processo. A precipitação é considerada igual em todos os ambientes. -----	79
Figura 4.6 Carta-imagem da divisão regional das bacias hidrogeológicas na região estudada. -----	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Coordenadas dos pontos de coleta de amostras de água para análises hidroquímicas (*H) e isotópicas (*I), incluindo seu contexto geológico, coordenadas dos pontos de amostragem e codificação das amostras. -----	59
Tabela 4.2 Comparação dos valores de referência de parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais dos diferentes modelos conceituais de aquíferos. η = porosidade, η_e = porosidade efetiva, K = condutividade hidráulica da zona saturada, T = transmissividade, S = coeficiente de armazenamento e Cesp = capacidade específica. -----	62
Tabela 4.3 Resultados dos ensaios de infiltração, gerando dados de condutividade hidráulica vertical, da zona não saturada, em superfície e subsuperfície, pelos ensaios de Anéis Concêntricos e <i>Open end Hole</i> . -----	63
Tabela 4.4 Parâmetros físico-químicos das águas coletadas na primeira campanha de monitoramento. -----	64
Tabela 4.5 Pontos onde foi realizado monitoramento dos parâmetros físico-químicos das respectivas águas, com dados das coordenadas UTM e os valores medidos de temperatura (T), condutividade elétrica (CE), pH e Eh, nas datas associadas. -----	69
Tabela 4.6 Localização das amostras para análises isotópicas e principais características dos pontos de coleta. -----	70
Tabela 4.7 Tabela com as amostras analisadas para Trítio e Radiocarbono, e suas respectivas informações. T: temperatura; CE: condutividade elétrica; HCO ₃ : bicarbonato; Ca: cálcio, Sr: estrôncio, Na: sódio, K: potássio. -----	71

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um modelo conceitual com a representação da dinâmica de fluxo entre os sistemas aquíferos Urucuia, Bambuí e Coluvionar, bem como compreender a produção hídrica de cada um desses sistemas e a sua interação com os cursos d'água superficiais. O trabalho foi desenvolvido na região nordeste do Goiás até o extremo oeste do estado da Bahia, abrangendo a Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV). Para tal propósito foram realizadas revisões bibliográficas e coleta de dados geológicos, hidrogeológicos, pedológicos, bem como análises hidroquímicas, análises isotópicas de trítio e carbono 14 em águas subterrâneas e superficiais, dados de monitoramento de parâmetros físico-químicos, ensaios de infiltração *in situ*, e informações de potenciometria de poços e nascentes compilados a partir de bancos de dados. O estudo comprovou o papel de destaque que o Sistema Aquífero Urucuia desempenha na região e o quanto o Sistema Aquífero Bambuí é dependente dos aquíferos intergranulares (sistemas Urucuia e Coluvionar). O Sistema Aquífero Bambuí é um compartimento onde as águas de precipitação escoam pela superfície nos locais em que ocorrem rochas pelíticas sob solos rasos, ou estas se infiltram rapidamente por infiltração para níveis mais profundos nos locais em que predominam rochas carbonáticas carstificadas (sendo drenadas rapidamente por meio de condutos e passagens subterrâneas para fora do sistema local). Os dados isotópicos demonstram que as águas mais antigas são vinculadas ao Sistema Aquífero Urucuia em seu subtipo regional profundo, associados a fluxo hidrogeológico profundo e regional. Amostragem no interior da Gruta da Tarimba comprovou que as águas que alimentam o fluxo subterrâneo são oriundas majoritariamente dos aquíferos intergranulares regionais. A composição química das águas superficiais que fluem sobre o Sistema Aquífero Bambuí mostra que se trata de misturas de águas ácidas de baixa mineralização com águas alcalinas de maior conteúdo de sais dissolvidos. Ainda, comprovou-se que águas produzidas exclusivamente pelo sistema cárstico são volumetricamente limitadas. O estudo proporcionou ainda, a compreensão da importância do Sistema Aquífero Coluvionar como um regulador dos recursos hídricos da região, para além do papel essencial do Sistema Aquífero Urucuia. O trabalho demonstrou também existência de assimetria regional entre os limites das bacias hidrogeológica e hidrográfica, e esta constatação deve ser considerada chave para o entendimento da dinâmica hídrica na região, sendo necessária que seja considerada nos processos de gestão regional dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Bacia hidrogeológica, fluxo regional, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The present study had as an objective the elaboration of a conceptual model with the representation of the dynamic of water flow between the aquifer systems Urucua, Bambuí and Coluvionar, as well as understand the water production of each one of these systems, besides the interaction with superficial water courses. The work was developed in the northeast region of Goiás State, until the uttermost west of Bahia state, Central Brazil, including the Environmental Protection Area Nascentes do Rio Vermelho. For this purpose, bibliographic reviews were performed, as well as collection of geological, hydrogeological, and pedological data, chemical analysis in water samples and isotopic analysis for tritium and radiocarbon both in groundwater and in superficial streams, physic-chemical parameters were monitored, infiltration tests, and information of potentiometric in wells and springs from database available. The study was able to verify the prominent role that Urucua Aquifer plays in the region, and how much the Bambuí Aquifer is dependent on intergranular systems (Urucua and Coluvionar). The Bambuí Aquifer System is a compartment where the precipitation waters drain through the surface in places with occurrence of pelitic rocks under shallow soils, or these waters infiltrate quickly in more deep levels in locations with predominance of karstified carbonate rocks (being drained very quickly through conduits and underground passages out of the system). The isotopic data demonstrate that the more ancient waters are linked to the Urucua Aquifer System in its profound regional subtype. Sampling inside of the Tarimba cavern proved that the waters that feed the underground flow are mostly native from the regional intergranular aquifers. Chemical composition of superficial waters that flow over Bambuí Aquifer System demonstrate that these are mixes between acidic and low mineralization waters with alkaline and enriched salt waters. Also, it was proven that the waters produced exclusively by the karstic system are volumetrically limited. The study provided the comprehension of the importance of the Coluvionar Aquifer System as a regulator of the region's water resources, beyond Urucua's essential role. It also demonstrated the existence of regional asymmetry between the limits of groundwater and hydrographic basins, and this realization must be considered a key point to the understanding of the water dynamics in the studied region, being necessary in management processes of regional water resources.

Keywords: Hydrogeologic basin, regional flow, water resources management.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e Justificativa

A delimitação de bacias hidrogeológicas configura importante ferramenta para a implementação de medidas de controle e gestão dos recursos hídricos de uma região, bem como para o estabelecimento de critérios de gestão integrada entre estados que compartilham de um mesmo aquífero transfronteiriço (Arraes, 2006 e Arraes & Campos, 2006). Esta importância se deve ao fato de que comumente há assimetria entre os limites de bacias hidrográficas e hidrogeológicas, a qual pode estar associada a alguns fatores, como anisotropia em sistemas fraturados e cársticos, heterogeneidade dos aquíferos, variações bruscas da potenciométrica em situações de limites laterais de aquíferos, presença de estruturas geológicas de grande porte como dobras ou falhas, ou presença de aquíferos com diferentes tipos de porosidade sobrepostos (Arraes & Campos, 2006).

O mapeamento dos limites de bacias hidrogeológicas pode ser realizado a partir de uma série de métodos de investigação hidrogeológica, diferenciados em métodos diretos e métodos indiretos. No primeiro destacam-se os estudos potenciométricos, ensaios de traçador e geoquímica isotópica. No segundo estão incluídos estudos geofísicos, geoprocessamento, estudos de hidrologia superficial e hidroquímica. A integração de diferentes técnicas pode levar a uma definição qualitativa dos limites das bacias ou até mesmo a uma determinação precisa dos mesmos.

Arraes & Campos (2010) utilizaram técnicas de potenciométrica para definição dos limites das bacias hidrogeológicas em escala regional na área do Sistema Aquífero Urucuia, na divisa dos municípios de Correntina, BA e São Domingos, GO. Neste contexto a potenciométrica foi utilizada como ferramenta para avaliação da distribuição do fluxo subterrâneo da área, a fim de traçar o divisor hidrogeológico na região. O divisor hidrográfico regional das bacias do Rio São Francisco e Tocantins foi determinado a partir de dados de topografia disponíveis em base cartográfica digital. Para a construção do mapa potenciométrico foi elaborado inventário com nascentes perenes e poços tubulares presentes na área, e as análises posteriores foram realizadas com a coleta dos valores de cota piezométrica dos poços, descontado os valores de nível estático medidos em campo. Após a construção do mapa potenciométrico e do mapa de linhas equipotenciais que apresenta a superfície potenciométrica, o divisor hidrogeológico pôde ser identificado e a assimetria entre os divisores hidrológico e hidrogeológico foi confirmada. O procedimento utilizado por Arraes e Campos (2010) servirá como base de parte do presente estudo, com adição de outros métodos, como hidroquímica, caracterização dos aquíferos e estudos isotópicos.

A região central do presente de estudo é a denominada Área de Preservação Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), localizada no extremo nordeste do estado de Goiás. A APA Nascentes do Rio Vermelho foi classificada como tal em 2001, com o objetivo principal de conservação do patrimônio espeleológico da região, onde até o presente momento foram registradas 150 cavernas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE). Informações sobre os sistemas cársticos da região podem ser encontradas nos seguintes trabalhos: ICMBIO/CECAV, (2017) e Motta, (2003). Ademais, é importante salientar que, apesar de a maior parte da área de estudo englobar o município de Mambaí no estado de Goiás, abrangendo a APANRV, a porção do extremo oeste do estado da Bahia é também parte essencial do trabalho desenvolvido.

Geologicamente, a área estudada contempla o contexto do Grupo Urucuaia, da Formação Lagoa do Jacaré pertencente ao Grupo Bambuí, e da transição entre os arenitos do Grupo Urucuaia para os carbonatos e siltitos do Grupo Bambuí, caracterizado aqui como material coluvionar. Hidrograficamente, a região está inserida na bacia do rio Tocantins a oeste e na bacia do rio São Francisco a leste, cujas nascentes partem da Serra Geral de Goiás, a qual constitui o divisor de águas (Chaves *et al.*, 2006). Há suposições de que na região exista assimetria entre os limites das bacias hidrográficas e hidrogeológicas. A hipótese de trabalho é de que a presença da Serra Geral de Goiás e demais particularidades geomorfológicas representem as estruturas responsáveis por tal fenômeno.

O contexto hidrogeológico é o da Província São Francisco, composta pelo Sistema Aquífero Urucuaia (SAU), formado por associação de aquíferos que ocorrem em arenitos flúvio-eólicos do Grupo Urucuaia (Gaspar & Campos 2007), o qual se sobrepõe a Formação Lagoa do Jacaré, e pelo Sistema Aquífero Bambuí, que compreende sequências pelítico-carbonáticas com metamorfismo incipiente, do Grupo Bambuí. As cavidades cársticas ocorrem principalmente na Formação Lagoa do Jacaré, havendo também dolinas onde os arenitos do Grupo Urucuaia não foram erodidos, e estas cavernas podem ser meândricas ou fluvio-cársticas. As meândricas são relacionadas ao sistema vadoso, enquanto as fluvio-cársticas são epigênicas e profundas.

Algumas questões referentes a atividades antrópicas no interior da unidade de preservação com potencial de impacto ao patrimônio espeleológico e, por consequência aos recursos hídricos nele abrigados foram relatadas pela equipe gestora da APANRV, dentre as quais: captação de água no interior de cavidade natural (para abastecimento público), atividades de mineração em áreas cársticas, atividades turísticas sem qualquer plano de manejo espeleológico, desmatamento próximo a cavidades e descarte de resíduos em áreas inadequadas (Ribeiro *et al.*, 2018). Foram detectados também problemas relacionados ao transporte de sedimentos e, portanto, de poluentes para os sistemas flúvio-cársticos neste contexto, o que representa elevado risco para a preservação da fauna e flora da região. Ainda, há ocorrência de

stress hídrico nas regiões da Formação Lagoa do Jacaré, devido à infiltração de grande parte da água de escoamento superficial para o sistema cárstico subjacente.

1.2 Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada na região centro-oeste do Brasil, no extremo nordeste do estado de Goiás, próximo ao limite sudoeste do estado da Bahia (Figura 1.1), a 320 km de Brasília. A APANRV insere-se nos municípios de Mambai e Damianópolis, sendo a primeira cidade o ponto central de logística para o projeto, principalmente em termos dos trabalhos de campo. As vias de acesso que conectam Brasília a Mambai são a BR-020 e a GO-236.

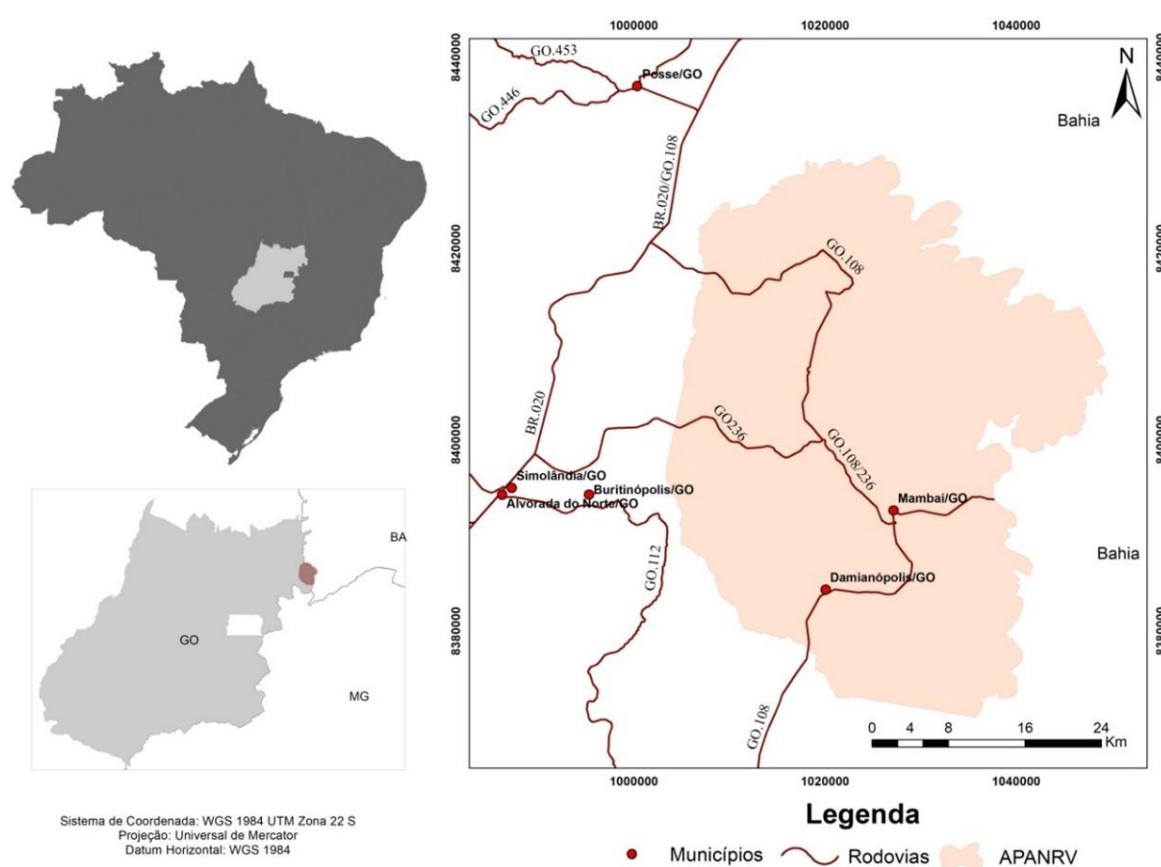


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para a Área de Preservação Nascentes do Rio Vermelho, em vermelho. Estão representadas também as principais vias de acesso ao local, partindo de Brasília. E nos mapas auxiliares à esquerda está destacada a localização do estado de Goiás no território brasileiro, e a APANRV no extremo nordeste do estado.

1.3 Objetivos

O objetivo principal do presente projeto é realizar uma caracterização qualitativa ou semiquantitativa da dinâmica de fluxo subterrâneo na região compreendida pela APA Nascentes do Rio Vermelho e definir os limites das bacias hidrogeológicas nesta região, considerando a possibilidade de assimetria entre os limites destas bacias subterrâneas com as bacias

hidrográficas sobrepostas, e determinando então, a interação entre os diferentes sistemas existentes no contexto da APA.

Secundariamente, pretende-se:

- ✓ Determinar a fonte de produção hídrica nas diferentes bacias;
- ✓ Verificar as relações de misturas entre as águas dos sistemas aquíferos Urucuia e Bambuí;
- ✓ Avaliar a contribuição de cada aquífero para o sistema flúvio-cárstico presente na região.

Os resultados obtidos a partir deste estudo visam subsidiar a elaboração de planos de gestão integrada dos recursos hídricos na região da APA Nascentes do Rio Vermelho, através de modelo conceitual de fluxo da área, e de mapas com a compartimentação hidrográfica e hidrogeológica, além de contribuir para o entendimento da dinâmica de funcionamento e abastecimento hídrico do nordeste do Goiás, região que sofre com escassez de água nos períodos de estiagem.

1.4 Materiais e Métodos

O trabalho foi desenvolvido em etapas, dentre as quais trabalhos de campo com monitoramento de nove pontos em cursos de água superficiais nos meses de Outubro/20, Janeiro/21 e Setembro/21, coletas de amostras de água para análises hidroquímicas e isotópicas, ensaios de infiltração nos solos, análises de laboratório e tratamento e interpretação dos dados coletados.

1.4.1 Levantamento Bibliográfico

Nesta etapa foi realizada pesquisa de informações geológicas e hidrogeológicas acerca da área de estudo, tanto em escala regional abrangendo os municípios de Alvorada do Norte, Damianópolis, Buritinópolis - GO e Jaborandi - BA, quanto em uma escala local, com foco no município de Mambá e na APA Nascentes do Rio Vermelho. Foram também levantados trabalhos sobre os métodos a serem utilizados, como análises hidroquímicas de elementos maiores, análises de isótopos de trítio e radiocarbono, ensaios de infiltração e potenciometria.

Além do levantamento de dados, neste primeiro momento foi confeccionado mapa base com imagem de satélite *Imagery* disponível no *software* ArcGis versão 10.8.2, com pontos de interesse para análise *in situ* e coleta de amostras destacados, além da hidrografia e principais vias de acesso.

Os pontos foram compilados a partir de banco de dados disponível no SIAGAS/CPRM com informações dos poços registrados na região em questão. Grande parte dos poços

registrados não pôde ser acessada, pois se encontravam fora de funcionamento no período de desenvolvimento do trabalho: em alguns casos estavam sem equipamento de bombeamento, ou sem bomba, ou ainda se encontravam lacrados e sem possibilidade de contato com os respectivos responsáveis.

1.4.2 Obtenção de Dados

No presente trabalho foram visitados ao todo 26 pontos, sem considerar os referentes ao reconhecimento inicial da área, realizado no primeiro período de atividade de campo. Os pontos mencionados são referentes aos três últimos trabalhos de campo realizados na região de Mambaí e arredores, e na Tabela 1.1 é possível acompanhar as datas e objetivos de cada um deles.

Tabela 1.1 - Período da realização dos trabalhos de campo e atividades desenvolvidas.

Período do Trabalho de Campo	Atividade Realizada
03/10/2020 a 05/10/2020	Reconhecimento da área e levantamento de informações sobre o meio físico: geologia, solos e relevo.
15 e 16/10/2020	Amostragem de água para análises hidroquímicas e medição de parâmetros <i>in situ</i> (monitoramento) - período de seca.
24/01/2021 a 26/01/2021	Ensaio de infiltração <i>in situ</i> e medição de parâmetros <i>in situ</i> (monitoramento) - período de chuva.
09/09/2021 a 11/09/2021	Amostragem de água para análises hidroquímicas e isotópicas e medição de parâmetros <i>in situ</i> (monitoramento) - período de seca.

Do total de pontos registrados e analisados, 9 deles foram monitorados nos últimos três meses mencionados, Outubro/20 no auge do período seco do ano, Janeiro/21 no período de chuvas pleno na região, e Setembro/21 novamente na seca, com medição dos seguintes parâmetros *in situ*: temperatura - T (°C), pH, condutividade elétrica - CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), e potencial de óxido-redução - Eh (mV). A medição *in situ* dos parâmetros físico-químicos foi realizada com a sonda multiparâmetro portátil da marca Hach, modelo HQ 40D (Figura 1.2).

As amostras de água para análise de cátions e ânions foram coletadas em recipientes plásticos de 1 litro, e armazenadas em caixa térmica com gelo, ao abrigo de luz e calor, sendo posteriormente transferidas para ambiente refrigerado no Laboratório de Geoquímica da UnB. Ao final do período de campo tais amostras foram filtradas em aparelho portátil com membrana de celulose descartável, com 0,45 μm Milipore (Figura 1.3).

No período de 24 a 26 de Janeiro de 2021 foram conduzidos ensaios de infiltração *in situ* em 11 pontos, com o objetivo de determinar o comportamento hidráulico da zona não saturada nos diferentes aquíferos estudados na região. Todas as classes de solos presentes na área da

pesquisa foram submetidas aos estudos para obtenção da condutividade hidráulica vertical: latossolo de textura arenosa, neossolo quartzarênico, cambissolo, argissolo e nitossolo. Foram realizados dois tipos de ensaios *in situ*: em superfície com auxílio do método dos anéis concêntricos e em profundidade com uso do método *open end hole*.



Figura 1.2 - Sonda Multiparâmetro da marca Hach utilizada nos trabalhos de campo para as medições *in situ* de pH, temperatura (°C), Eh e condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

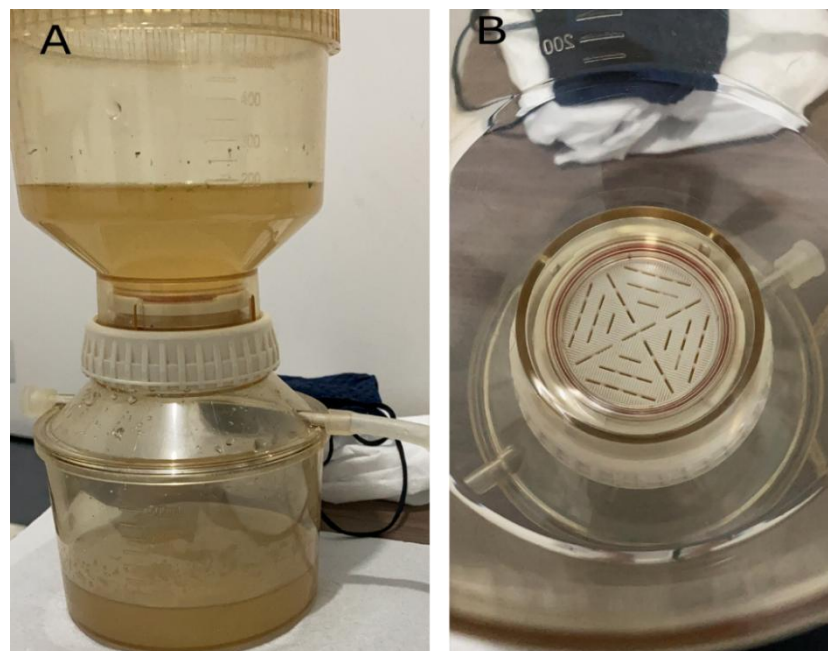


Figura 1.3 - Aparelho portátil utilizado na filtração das amostras para análise hidroquímica, em campo. Na figura B da direita é mostrado o local onde se insere a membrana em ésteres de celulose descartável, com poros de $0,45\mu\text{m}$.

O método dos Anéis Concêntricos é um tipo de ensaio de infiltração *in situ*, que busca determinar a condutividade hidráulica vertical (K_v) na zona não saturada. Este método busca determinar a K_v apenas em superfície, e nele utilizam-se dois cilindros concêntricos, como pode

ser observado na Figura 1.4. Os anéis são cravados no solo de forma que não haja dispersão lateral da água, sendo importante que os anéis estejam nivelados. Então é realizada a medida da profundidade penetrada no solo, denominada de I. Na sequência é adicionada água ao anel externo até que o nível seja estabilizado; quando o solo atinge a saturação, o anel interno é completado com água. A altura do topo do anel até a coluna d'água no anel interno é medida, denominada de medida inicial - Mi. Então o tempo é cronometrado até que a água infiltre no solo. Em seguida a altura do topo até o novo nível d'água é medido, sendo denominada medida final - Mf, e o cronômetro é pausado, fornecendo o valor do tempo final - Tf. O cálculo de Kv é realizado através da fórmula: (Fiori, 2010):

$$Kv = u \times \left(\frac{I}{\Delta t}\right) \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

Onde:

Kv = condutividade hidráulica vertical (m/s);

I = profundidade cravada no solo (mm);

Δt = tempo de duração do ensaio (min);

u = 1/60000 = fator de conversão de mm/min para m/s;

h₀ = H – I – Mi = carga hidráulica inicial (mm);

h = H – I – Mf = carga hidráulica final (mm);

Mi = medida inicial;

Mf = medida final;

H = altura total do cilindro (normalmente 250 mm).

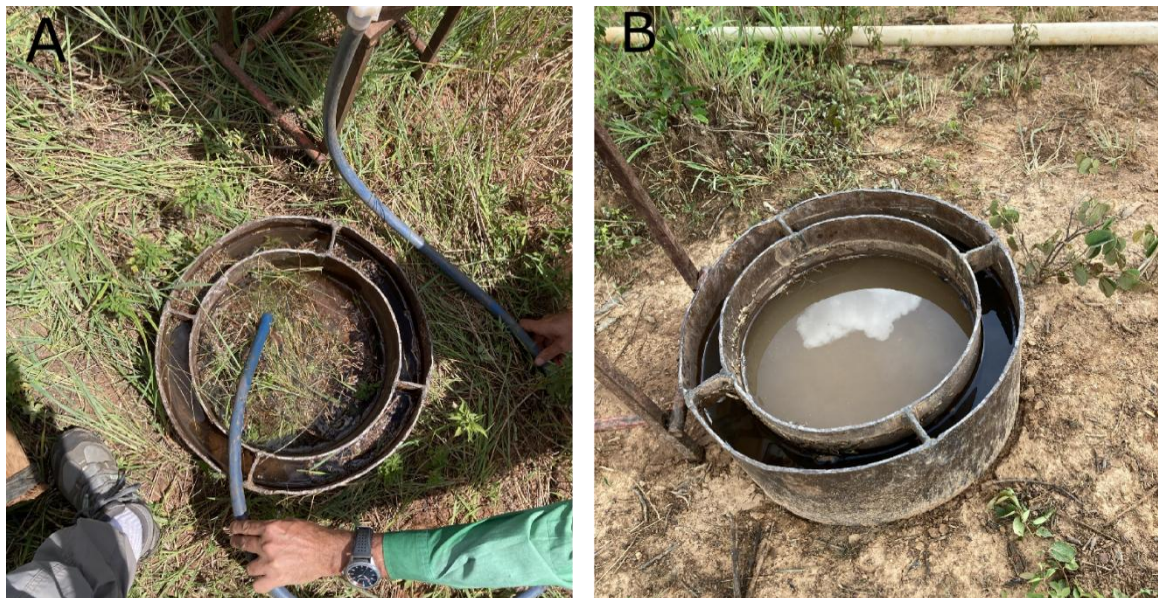


Figura 1.4 - Ilustração da realização de ensaio pelo método dos Anéis Concêntricos em diferentes tipos de solos observados na região de estudo.

O método *Open end Hole*, como o dos anéis concêntricos, também é um tipo de ensaio de infiltração *in situ*, mas ele busca determinar a condutividade hidráulica vertical em diferentes profundidades na zona não saturada. Logo, para este ensaio são utilizados quatro tubos de PVC

com 50 mm de diâmetro e comprimentos variáveis, comumente de 50, 100, 150 e 200 centímetros. Os tubos devem ser cravados em furos de profundidades similares aos respectivos comprimentos, e estes são realizados com auxílio de trado manual e de escavadeira articulada (tipo “boca de lobo”), como representado na Figura 1.5. Os tubos então são preenchidos com água e as distâncias entre o topo do tubo e o nível d’água são medidas, M_i e M_f , tanto no momento inicial (T_0), quanto no final (T_f), obtendo-se então a quantidade de água infiltrada no espaço de tempo decorrido. Importante ressaltar que as medidas nos diferentes tubos são feitas em sequência após o início da cronometragem, então os tempos de cada tubo podem ser ligeiramente distintos. A fórmula utilizada para o cálculo da condutividade hidráulica vertical é a que segue:

$$K_v = 2,303 \times \left(\frac{R}{4\Delta t} \right) \times \log \left(\frac{h_0}{h} \right)$$

Onde:

K_v = condutividade hidráulica vertical (m/s)

R = raio do tubo (m) = 0,025m

Δt = intervalo de tempo para o rebaixamento da água (s)

$h_0 = H - M_i$ = carga hidráulica inicial (cm)

$h = H - M_f$ = carga hidráulica final (cm)

H = altura da boca do cano até a base da cavidade cavada (cm)



Figura 1.5 - Ilustração de campo durante realização de ensaio *Open end Hole*. Em ambos os casos estão representados os 4 furos necessários para cada ensaio, os quais foram realizados com escavadeira articulada e trado manual.

Ambos os ensaios de infiltração *in situ* apresentados anteriormente foram realizados nos pontos selecionados. Para cada ponto foi associado o tipo de solo, as coordenadas UTM e altitude, e a condutividade hidráulica K_v (m/s), calculada em planilha Excel com base nas fórmulas mostradas anteriormente, segundo os métodos de Anéis Concêntricos e *Open end Hole*. Estes resultam em condutividades hidráulicas verticais para cada uma das quatro profundidades ensaiadas.

As amostras para análise isotópica foram obtidas no período de 09 a 11 de Setembro de 2021. Nesta ocasião coletou-se 2 litros de água por amostra para análises de trítio, em recipiente de polietileno de alta densidade, e 1 litro por amostra para análises de radiocarbono, armazenado em recipiente de polipropileno. As amostras foram enviadas para o seu respectivo laboratório de destino após coleta em campo.

1.4.3 Análises Laboratoriais

Análises Hidroquímicas

As análises hidroquímicas foram realizadas no Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília - LaGeq, com auxílio do técnico de laboratório Dr. Myller de Souza sob supervisão do professor Dr. Jérémie Garnier, responsável pelo laboratório. Ao todo foram dezenove amostras analisadas, as quais foram coletadas de acordo com o item 1.3.2 descrito anteriormente.

Os cátions alumínio, cálcio, ferro, potássio, magnésio, manganês, sódio, sílica e estrôncio foram analisados em Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), da marca Agilent (USA), modelo 5110. O plasma é mantido por gás argônio de qualidade industrial com fluxo principal de 0,7 L/min, fluxo auxiliar de 2 L/min e fluxo para resfriamento de 18 L/min.

Os ânions fluoreto, cloreto, nitrato, sulfato e fosfato foram determinados por meio de cromatografia iônica (IC), em aparelho da marca Metrohm modelo 881 Compact IC pro.

A alcalinidade também foi determinada em todas as amostras coletadas, por meio do método titulométrico de análise, com H₂SO₄ a 0,01N padronizado anteriormente com NaOH a 0,05N, utilizando titulador manual. O cálculo realizado para obtenção das alcalinidades foi:

$$HCO_3^- \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = \text{Vácido} \times \text{Mácido} \times 61000 \times \text{Vamostra}^{-1}$$

(resultado expresso em bicarbonato)

Análises Isotópicas

No presente trabalho foram realizadas análises isotópicas para trítio (T) e para radiocarbono (¹⁴C). Ao todo foram 8 amostras analisadas para o primeiro isótopo e 6 amostras para o segundo.

As análises de Trítio foram gerenciadas pela Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep), e realizadas pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), ambos pertencentes ao estado de Minas Gerais, com sede em Belo Horizonte. O método de análise utilizado foi Enriquecimento Eletrolítico seguido de Análise em Cintilador Líquido em Sala de

Contagem de Ultrabaixo Nível de Radiação de Fundo - EELSC, com limites mínimos de determinação de 0,40 UT (unidades de trítio).

As análises de radiocarbono foram realizadas pelo *Beta Analytic Testing Laboratory*, localizado em Miami, EUA. O método de análise utilizado foi Espectrometria de Massas com Aceleradores (AMS), realizada em grafite produzido pela redução em hidrogênio da amostra de CO₂ em um catalisador de cobalto. O CO₂ é obtido através da combustão da amostra a mais de 800°C em uma atmosfera de oxigênio a 100%. Primeiro o CO₂ é secado com metanol/gelo seco; em seguida ele é recolhido em nitrogênio líquido para a grafitização que ocorrerá na sequência. A mesma reação é realizada também em um padrão de referência, em uma amostra interna de controle de qualidade, e em uma amostra *background* para garantir a química sistemática. Os resultados foram obtidos a partir do carbono inorgânico dissolvido (DIC em inglês) e são apresentados tanto em porcentagem de carbono moderno (pMC em inglês) quanto em fração de carbono moderno (F¹⁴C). O relatório final com os resultados também inclui dados das razões isotópicas dos isótopos estáveis de δ13C, δ18O e δ2H.

1.5 Fundamentação Teórica

1.5.1 Bacias Hidrogeológicas

As bacias hidrogeológicas devem ser a unidade básica de gestão dos recursos hídricos subterrâneos – em uma escala local, mas com implicações regionais –, assim como as bacias hidrográficas são a unidade de gestão das águas superficiais. No entanto, o conceito de bacia hidrogeológica ainda não é bem difundido na literatura quanto o de bacia hidrográfica, por ser uma entidade tridimensional de mais difícil visualização e investigação. Tiedman *et al.* (1998) definiram bacia hidrogeológica como os limites e caminhos que o fluxo subterrâneo percorre através do aquífero, englobando desde as zonas onde ocorre a recarga até as zonas dos exutórios. Desde Tiedman *et al.* (1998) não foram realizados trabalhos que busquem conceituar e definir as ferramentas necessárias para a delimitação de bacias hidrogeológicas, até que Arraes (2008) e Arraes & Campos (2007 e 2010) publicaram trabalhos que tratam da proposição de critérios para a delimitação destas bacias (Arraes & Campos, 2007), e que abordam mais especificamente a utilização de traçadores e dados de potenciometria na determinação destas unidades de gestão de recursos subterrâneos.

A delimitação dos limites de bacias hidrogeológicas é de suma importância quando se trata de gerenciamento dos recursos hídricos de uma determinada região ou aquífero. Isto se faz porque não necessariamente os limites de uma bacia hidrogeológica coincidem com aqueles da bacia hidrográfica subjacente, situação na qual se diz que há assimetria entre os limites das bacias. Há certas configurações geológicas, por exemplo, em que uma única bacia hidrográfica

comporta duas bacias hidrogeológicas sobrepostas verticalmente, por ocorrência de heterogeneidade nas camadas hidroestratigráficas do aquífero. Como no caso em que uma camada de calcário margoso está sobreposta a uma camada de calcário maciço, nesse caso a dinâmica de fluxo em subsuperfície e o escoamento de base das duas unidades provavelmente serão distintos, caracterizando, portanto, duas sub-bacias hidrogeológicas sobrepostas verticalmente.

A definição da extensão lateral de uma bacia hidrográfica é feita de maneira relativamente simples. A análise de modelos digitais de elevação (MDE) fornece informações de declividade, topografia e hipsometria, e tais aspectos indicam a direção na qual haverá escoamento superficial. Estes pontos onde há divergência do escoamento na superfície são o que definem os limites de uma bacia hidrográfica – definidos pelo divisor hidrográfico. Já no caso de bacias hidrogeológicas a definição dos limites não é tão trivial, pois existe uma série de fatores que podem gerar divergência entre a direção do escoamento de base e o fluxo em subsuperfície. Dentre os fatores mais comuns estão anisotropia em sistemas fraturados e cársticos, heterogeneidade dos aquíferos, estrutura geológica de expressão regional, como dobras ou falhas de grande escala, e variações bruscas na potenciometria em situações de limites laterais de aquíferos (Arraes & Campos, 2007).

Dentre as ferramentas utilizadas na delimitação dos limites de bacias hidrogeológicas estão os estudos potenciométricos, estudos hidrológicos, ensaios de traçador, geoquímica isotópica, análise de lineamentos e estudos geofísicos (Arraes & Campos, 2007), como mencionado inicialmente no capítulo introdutório. Todos estes métodos devem ser somados a um conhecimento prévio da geologia da área onde se procura determinar os limites.

Cabe destacar que é mais comum que os limites das bacias hidrográficas e hidrogeológicas coincidam, uma vez que a topografia influencia (não determina) o potencial hidráulico em determinado ponto na superfície, e a teoria explica que o fluxo subterrâneo ocorre de locais de maior potencial para locais de menor potencial. Mas, como explicitado anteriormente, existem diversos fatores que podem afetar e redirecionar o fluxo em subsuperfície, gerando então as assimetrias mencionadas.

1.5.2 Hidroquímica

As análises hidroquímicas são essenciais para a caracterização das águas de determinada região. Elas são uma das principais ferramentas utilizadas na investigação de possíveis contaminações, além de fornecerem indicativos sobre os ambientes de circulação e mistura entre águas de origens e reservatórios distintos. Através da hidroquímica é possível também determinar grupos de águas, através da plotagem dos resultados das análises em diagramas do

tipo Piper ou Stiff, utilizando-se o no software QualiGraf, por exemplo.

Feitosa *et al.* (2008) consideram que as assinaturas hidroquímicas das águas são influenciadas por uma série de fatores, dentre eles os padrões de fluxo existentes no aquífero, a mineralogia que compõe o reservatório em si, as estruturas presentes, os processos geoquímicos predominantes, a composição química da água de recarga, os tipos de fluxo hidrogeológico envolvidos (locais, intermediários ou regionais), os tipos de solos, além dos aspectos climáticos. O conhecimento de tais parâmetros e processos é de extrema importância para a elaboração de modelos conceituais de fluxo.

A caracterização hidroquímica pode ser baseada em análises de elementos e substâncias maiores, isto é, mais comumente presentes na água subterrânea, ou em substâncias e elementos menores (que ocorrem em menores teores ou de forma menos abundante). Dentre as substâncias maiores se destacam sódio, potássio, cálcio, magnésio, bicarbonato, cloreto, sulfato e sílica. Os elementos menores são geralmente representados por amônia, nitrito e nitrato (presentes como contaminantes), metais, gases e fluoreto.

1.5.3 Métodos Isotópicos

Trítio

O trítio (^3H ou T) é o isótopo mais pesado do hidrogênio e o único radioativo, decai para hélio ao emitir partículas, e possui meia-vida de 12,3 anos. Ele é produzido naturalmente através do bombardeio dos gases da atmosfera terrestre por raios cósmicos. Outra fonte de trítio são as explosões termonucleares que ocorreram no planeta a partir da década de 1950, com concentrações de ^3H no hemisfério norte superiores às do hemisfério sul (Feitosa, 2008). Importante ressaltar também que devido à curta meia-vida do T, este em princípio é utilizado para datação de águas muito mais jovens, de até aproximadamente 50 anos. Porém, em razão da grande variação de sua concentração na atmosfera desde os anos 50, o uso de ^3H natural é mais utilizado na interpretação qualitativa para detecção de recarga recente.

A medição de Trítio é feita através da radiação emitida, e sua concentração é determinada com a atividade específica. A unidade utilizada é Unidades de Trítio (UT ou TU em inglês), onde 1 UT corresponde a 1 átomo de ^3H para 10 átomos de hidrogênio (^1H), ou a 7,2 desintegrações por minuto para cada quilograma de água (Feitosa, 2008).

Radiocarbono

O ^{14}C corresponde ao isótopo radioativo do carbono, e foi produzido inicialmente por meios artificiais em laboratório, em 1940 por Martin Kamen e Sam Ruben, a partir do bombardeio do grafite em um ciclotron, no Laboratório de Radiação da Universidade de

Berkeley, Califórnia. O objetivo do experimento era produzir um isótopo radiativo do carbono, a fim de utilizá-lo como traçador em sistemas biológicos (Ruben e Kamen, 1941; Kamen, 1963). Apenas em 1946 foi descoberto o ^{14}C de origem cosmogênica na atmosfera, por Willard F. Libby.

O ^{14}C cosmogênico é produzido na atmosfera superior a partir da reação nuclear envolvendo o ^{14}N , e é então oxidado gerando ^{14}CO e depois $^{14}\text{CO}_2$, misturando-se à atmosfera (Murphy & Katz, 1998). Esta radioatividade natural existe em qualquer matéria viva que está em contato com a atmosfera da Terra e, portanto, tais organismos apresentarão o mesmo conteúdo de radiocarbono que ela, enquanto vivos e numa situação de equilíbrio. Porém, para organismos mortos ou materiais abióticos retirados da situação de equilíbrio com a atmosfera, observou-se que as concentrações de radiocarbono diminuam exponencialmente de maneira previsível com o tempo.

A meia-vida do radiocarbono é de aproximadamente 5568 anos (“meia vida de Libby”) (Libby, 1952), valor utilizado em todos os laboratórios de análise, por convenção internacional. Esta meia-vida significa que uma amostra perderia 50% da sua concentração do isótopo a cada período de 5568 anos decorridos. Logo, em resumo, a idade de radiocarbono é o tempo que passou desde que a amostra foi removida da situação de equilíbrio na qual ela se encontrava com a atmosfera, seja por morte no caso de plantas ou animais, ou por mudança de área de circulação, como no caso de águas superficiais que infiltram na subsuperfície, onde não há contato com o ar (Beta Analysis Laboratory, 2021). Considerando esta meia-vida de 5568 anos, o método de radiocarbono é utilizado para datação de águas subterrâneas mais antigas que 250 anos até no máximo 40.000 AP (antes do presente). Para águas mais jovens que 250 AP, o método apresenta elevado erro associado, e utiliza-se então o método de datação pelo trítio.

Porém, a datação de águas pelo método do radiocarbono apresenta uma complicação em relação ao material orgânico: a atividade inicial dos bicarbonatos dissolvidos na água não costuma ser igual à da atmosfera A0, pois ela possui uma relação de dependência com o meio hidrogeoquímico, tanto na área de recarga, quanto no aquífero. Por essa razão são utilizados modelos de correção para a atividade inicial. As correções também são necessárias para sistemas ricos em carbonatos, pois pode haver um influxo de carbono a partir da dissolução de minerais carbonáticos, o que pode resultar em idades não compatíveis com o tempo de permanência da água no aquífero. O modelo de correção adotado no presente trabalho será apresentado no capítulo 4, de Resultados e Discussões.

O Capítulo 2 traz o conteúdo referente aos conceitos e aplicações das Bacias Hidrogeológicas na forma de artigo científico, o qual será submetido à periódico nacional sobre águas subterrâneas.

CAPÍTULO 2 - BACIAS HIDROGEOLÓGICAS: CONCEITOS E APLICAÇÕES

Hydrogeological Basins: Concepts and Applications

Manuela Freire Galvão¹ e José Eloi Guimarães Campos²

1. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília.

e-mail: manuelafgeo@gmail.com.

2. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. e-mail: eloi@unb.br.

RESUMO

Uma bacia hidrogeológica representa um compartimento em subsuperfície com fluxo convergente para um único exutório. Ao contrário de uma bacia hidrográfica que pode ter seu exutório representado por um ponto, na bacia hidrogeológica a zona de descarga é representada por uma área, ou um corpo hídrico de superfície, ou segmento de curso d'água superficial. Um conjunto de bacias hidrogeológicas pode ocorrer de forma sobreposta em função da complexidade geológica regional, da espessura dos estratos e do relevo na superfície. A determinação dos limites das bacias hidrogeológicas associadas a um aquífero ou conjunto de aquíferos é importante para o entendimento da dinâmica de fluxo em subsuperfície, além de auxiliar na compreensão da relação com as bacias hidrográficas que as sobrepõem em superfície. Entretanto, apesar de sua importância este não é um tema recorrente na literatura aplicada aos recursos hídricos subterrâneos, sendo uma terminologia ainda pouco utilizada no meio científico. Considerando tais questões, o presente trabalho propõe uma revisão do conhecimento a respeito das bacias hidrogeológicas, bem como expande e atualiza seu conceito e discute suas aplicações para diferentes contextos. Neste sentido, o trabalho apresenta as implicações do conhecimento das bacias hidrogeológicas para diversas aplicações, incluindo: gestão de recursos hídricos, projetos de recarga artificial, estimativa de reservas hídricas, desenvolvimento de modelos conceituais e simulações numéricas, dentre outras.

Palavras-chave: bacia hidrogeológica, bacia Hidrográfica, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

A hydrogeological basin represents a subsurface compartment with convergent flow for a single discharge zone. Unlike a watershed that has the discharge represented by a single point, in the hydrogeological basins the discharge zone is represented by an area, or a surface water body, or a surface water course segment. A set of hydrogeological basins can occur in an overlapping way due to the regional geological complexity, the thickness of the strata and the relief pattern on the surface. Determination of the boundaries of the hydrogeological basins associated with an aquifer or set of aquifers is important for understanding the flow dynamics in subsurface, besides helping the comprehension of the relationship with the watershed that overlap them on the surface. However, despite its importance this is not a recurring theme in the literature applied to underground water resources, being a terminology is still little used in the scientific environment. Considering these issues, the present paper proposes a review of knowledge about hydrogeological basins, as well as expands and updates its concept and discusses its applications for different contexts. In this sense, this paper presents the implications of the knowledge of hydrogeological basins for several applications, including: water resources management, artificial recharge projects, estimation of water reserves, development of conceptual models and numerical simulations, among others.

Keywords: groundwater basin, watershed, water resources management.

1. INTRODUÇÃO

As bacias hidrogeológicas são a unidade básica de gestão dos recursos hídricos subterrâneos em uma escala local, da mesma forma que as bacias hidrográficas são a unidade de gestão das águas superficiais. No entanto, o conceito de bacia hidrogeológica ainda não está tão bem definido na literatura quanto o de bacia hidrográfica. Tiedman *et al.* (1998) definiram bacia hidrogeológica como os limites e caminhos que o fluxo subterrâneo percorre através do aquífero, englobando desde as zonas onde ocorre a recarga até as zonas de exutório específico. Desde Tiedman *et al.* (1998) não foram realizados trabalhos que buscassem conceituar e definir as ferramentas necessárias para a delimitação de bacias hidrogeológicas, até que Arraes (2008) e Arraes & Campos (2007 e 2010) publicaram trabalhos que tratam da proposição de critérios para a delimitação destas bacias. Estes trabalhos que abordam mais especificamente a utilização de traçadores e dados de potenciometria na determinação destas unidades de gestão de recursos subterrâneos.

Os limites das bacias hidrográficas e hidrogeológicas subjacentes podem coincidir ou não, configurando em simetria ou assimetria entre estes limites, sendo que quando são coincidentes são denominados de limites simétricos e quando discordantes são chamados de limites assimétricos. A fim de determinar as relações entre os limites destas unidades hidrográficas, Arraes e Campos (2007) propuseram o uso das seguintes técnicas para delimitação das bacias hidrogeológicas: estudos potenciométricos, estudos hidrológicos, ensaios de traçador, geoquímica isotópica, análise de lineamentos e estudos geofísicos.

A definição da extensão lateral de bacias hidrogeológicas é mais abstrata que de bacias hidrográficas, onde seus limites podem ser obtidos de maneira relativamente simples e acessível através da análise de modelos digitais de elevação, de onde dados como declividade, topografia e hipsometria podem ser avaliados. Já no caso das bacias hidrogeológicas, uma bacia pode apresentar extensão maior do que a de sua bacia hidrográfica sobrejacente (Tiedman *et al.* 1998) (Figura 1). Da mesma maneira pode ocorrer o oposto, uma bacia hidrográfica pode abranger diversas bacias hidrogeológicas subjacentes a ela (Figura 2.1), o que acontece quando o fluxo em subsuperfície e o escoamento de base apresentam padrões divergentes (Arraes e Campos, 2007), com pontos de recarga e exutórios distintos.

A determinação dos limites hidrográficos pode ser facilmente alcançada com auxílio de ferramentas digitais diretamente sobre mapas planialtimétricos ou imagens de satélite (desde que permitam produzir os modelos digitais de elevação). Ao contrário, a delimitação das bacias hidrogeológicas é complexa e requer a atuação de um especialista, além de amplo conjunto de dados que deve ser analisado de forma integrada.

No conjunto de dados destacam-se: níveis freáticos pontuais ou na forma de mapas de isopiezas (mapas potenciométricos), informações hidroquímicas, elementos hidrográficos, dados de vazão de nascentes, estruturas geológicas (com destaque para dobras regionais e principais lineamentos estruturais), além de subsídios complementares.

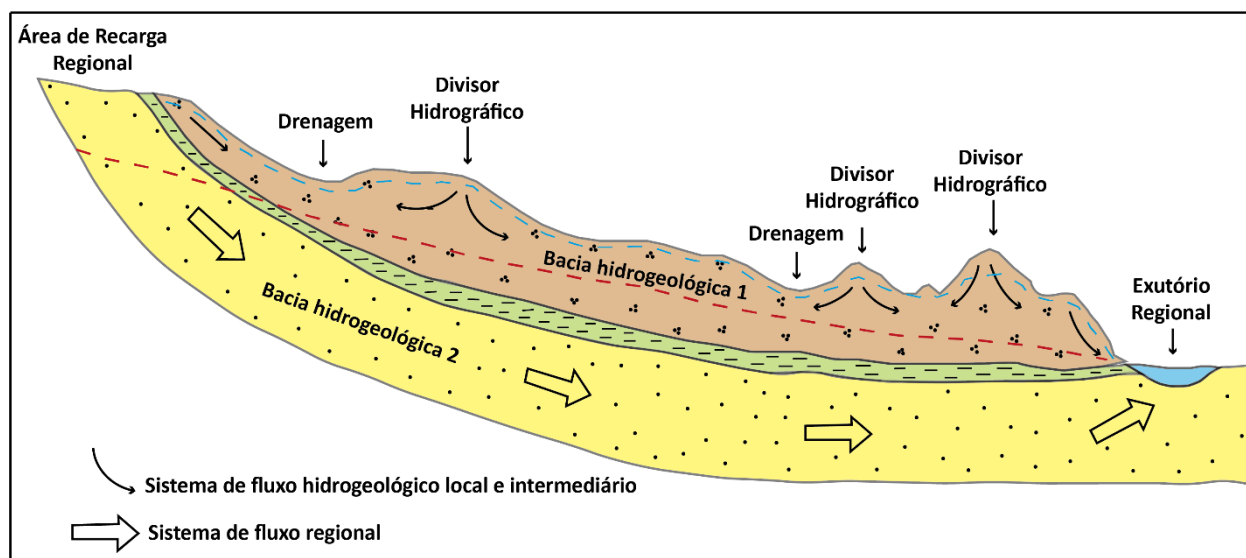


Figura 2.1. Ilustração esquemática demonstrando caso em que duas bacias hidrogeológicas são sobrepostas verticalmente por apresentarem sistemas de fluxo distintos, com um aquífero representado por camada de folhelho entre elas. A bacia hidrogeológica 1 se caracteriza por sistemas de fluxos hidrogeológicos locais e intermediários, e a bacia hidrogeológica 2 por fluxo regional. Este é um caso em que a área de uma única bacia hidrogeológica corresponde a diversas bacias hidrográficas. A linha pontilhada em vermelho representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero 2, e a linha pontilhada azul representa a do sistema aquífero 1. Modificado de Arraes e Campos (2007).

Outro aspecto importante na distinção entre bacias hidrográficas e hidrogeológicas envolve o caso de avaliação de sistemas aquíferos, entendendo-se que um sistema aquífero é composto por diferentes subtipos de aquíferos (como é o caso dos sistemas aquíferos Guarani ou Urucua). Uma bacia hidrogeológica pode ser composta por apenas um subtipo ou por mais de um subtipo de aquífero que compõe o sistema. Esta distinção dependerá da organização lateral e vertical das unidades que formam o sistema aquífero como um todo.

Assim o objetivo do presente artigo é contribuir com as discussões sobre o conceito, as ferramentas para delimitação, e as implicações do conhecimento sobre as bacias hidrogeológicas ou bacias subterrâneas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho representa uma contribuição sobre um importante tema da hidrogeologia, a partir da discussão do próprio conceito e definição de bacia hidrogeológica, sua comparação com as bacias hidrográficas e as implicações de sua delimitação. Assim, não é um trabalho baseado em um método específico que envolva experimentos, geração de base de dados, análises hidroquímicas ou avaliações estatísticas de informações.

O método é baseado na análise empírica de dados existentes, casos específicos e sua contextualização no problema abordado e na experiência dos autores em estudos de bacias hidrogeológicas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Conceituação e Critérios para Delimitação

O uso de modelos conceituais é essencial para o entendimento do funcionamento de sistemas hidrogeológicos, bem como para a elaboração de diretrizes e planos de gestão dos recursos hídricos de uma região. Para Demiroglu (2006), o termo modelo conceitual engloba as características relativas à extensão e à distribuição espacial do sistema, ou seja, os limites tridimensionais dos aquíferos. A elaboração de um modelo conceitual requer dados sobre a área de estudo, informações detalhadas a respeito da geologia da região, dinâmica do fluxo subterrâneo, da recarga, parâmetros hidráulicos, além dos limites bem definidos das bacias hidrogeológicas. Dessa forma, a definição dos limites das bacias ou sub-bacias hidrogeológicas possibilita o entendimento da ocorrência e do fluxo da água subterrânea, e compreende dados tanto do fluxo de entrada (recarga) quanto do fluxo de saída (descarga) do sistema superficial e subterrâneo.

As bacias hidrográficas normalmente são definidas por divisores localizados em regiões de elevada altitude entre duas áreas de menor altitude. Os divisores das águas subterrâneas normalmente coincidem com os divisores superficiais para aquíferos granulares e não confinados, porém as áreas de recarga de aquíferos cársticos e confinados frequentemente não coincidem com as áreas superficiais de drenagem (White, 2002; Gunn, 2007; Palmer, 2010; Demiroglu, 2016).

A definição do conceito de bacia hidrogeológica é muito importante para a elaboração de diretrizes de gestão das águas subterrâneas, sendo essencial mencionar que os limites das bacias hidrogeológicas podem alterar ao longo do tempo, a depender da exploração vigente no local. Portanto, a utilização das técnicas de delimitação, e o monitoramento destes limites são de extrema importância.

Os métodos utilizados na definição dos limites entre bacias hidrogeológicas são em grande parte qualitativos, porém a integração entre as diferentes técnicas, mesmo as semiquantitativas, pode fornecer resultados mais precisos. Uma análise essencial que deve ser realizada antes da aplicação dos métodos de delimitação citados, é a da dinâmica dos fluxos subterrâneos, tanto locais quanto de base, bem como dos fluxos superficiais, levando em consideração a classificação dos cursos d'água superficiais efluentes e influentes.

Estudos Potenciométricos

A água subterrânea se movimenta através dos poros existentes no arcabouço das rochas, incluindo espaços intersticiais (aquíferos intergranulares), por fraturamento (aquíferos fraturados e de dupla porosidade) e por dissolução (aquíferos cársticos e físsuro-cársticos). Este fluxo subterrâneo é gerado por diferenças de potencial entre pontos de altitudes distintas, situação na qual a água flui de pontos de maior potencial para pontos de menor potencial hidráulico.

O método envolve três conceitos básicos, o de superfície potenciométrica, superfície equipotencial e linha equipotencial (Feitosa, 1997). O primeiro consiste no lugar geométrico formado pelos pontos que determinam as alturas potenciométricas de um aquífero, as quais são referentes a uma profundidade específica. O segundo, de superfície equipotencial, é determinado como uma superfície virtual onde todos os pontos possuem o mesmo potencial hidráulico (ou carga hidráulica). A linha equipotencial se caracteriza como a projeção no plano da intersecção da superfície potenciométrica com um plano de cota potenciométrica definida. O mapa potenciométrico, por fim, é o conjunto de linhas equipotenciais geradas pela projeção de diversas intersecções da superfície potenciométrica com planos de diferentes cotas potenciométricas. Tais mapas possibilitam a visualização bidimensional da direção de fluxo subterrâneo, e são elaborados a partir de dados de níveis potenciométricos obtidos em pontos d'água, que podem ser representados por poços de produção (desde que em repouso do bombeamento), por poços de monitoramento, poços escavados e nascentes.

A elaboração de mapas potenciométricos é a principal ferramenta para a determinação dos limites das bacias hidrogeológicas, pois fornecem direções de fluxo subterrâneo em duas dimensões, que devem ser comparadas com as direções de fluxo da bacia hidrográfica sobrejacente. Assim pode-se determinar se há alguma assimetria indicada por direções distintas de fluxo ou não.

Para os casos em que o número de poços é insuficiente ou mal distribuído pela área de ocorrência do aquífero, outras ferramentas devem ser utilizadas para a delimitação das bacias subterrâneas.

Estudos Hidrológicos

As heterogeneidades e anisotropias do meio geológico subterrâneo frequentemente podem fazer com que as vazões medidas sejam diferentes do que esperadas a partir da análise fisiográfica do terreno (Arraes e Campos, 2007).

A análise das vazões específicas de cursos superficiais d'água fornece somente um indicativo de que pode ou não haver assimetria entre os limites das bacias, logo este não é um método de análise preciso para determinação das bacias hidrogeológicas subjacentes. Entretanto,

este critério pode ser utilizado para uma primeira aproximação na escala de avaliação de grandes bacias hidrográficas.

Esta ferramenta é particularmente útil para sistemas cársticos e fissuro-cársticos, em que o próprio modelo conceitual dos sistemas é complexo e de difícil previsão, uma vez que o conjunto de fluxo de canais subterrâneos pode apresentar padrão convergente ou até divergente.

Ensaio de Traçadores

Os estudos com traçadores com uso de corantes fluorescentes, sais ou outras substâncias representam uma excelente ferramenta para a delimitação de bacias hidrogeológicas, pois validam os limites indicados pelos demais métodos, além de definirem com precisão os limites, uma vez que os ensaios necessitam de acesso direto aos aquíferos, através de poços ou sumidouros em aquíferos cársticos (Arraes e Campos, 2007). Os ensaios com traçador possuem também o benefício de possibilitar a definição dos limites quando estes variam no espaço em função de bombeamento de aquíferos livres sob exploração.

Traçadores em águas subterrâneas fornecem dados de padrão de fluxo no interior do aquífero, velocidade linear média da água, dispersão longitudinal e lateral, dentre outros. Ensaio com traçadores também auxiliam na definição com maior precisão dos parâmetros hidrodinâmicos: condutividade e transmissividade do aquífero. Como estes ensaios requerem elevada quantidade de poços monitorados, e ampla geração de dados, sua aplicação é recomendada para estudos em áreas menores e com objetivos específicos como, por exemplo, a delimitação de condições de contorno em projetos de modelagem de aquífero para remediação *in situ*.

Geoquímica Isotópica

Os estudos isotópicos podem ser importantes para a delimitação das bacias a partir da determinação do sinal isotópico das águas de recarga ou a partir da datação das águas depois que foram inseridas no aquífero por recarga.

Os isótopos radioativos de Carbono 14 e Trítio são amplamente utilizados na datação de águas devido às suas meias-vidas, que se adequam aos intervalos necessários para a datação, e por serem elementos naturalmente presentes nas águas. O Trítio apresenta meia-vida de 12,3 anos, e é utilizado na datação de amostras de águas jovens. O Carbono 14 apresenta meia-vida de 5.730 anos, e é adequado para a datação de amostras mais antigas, de 500 a 40.000 anos (Feitosa *et al.* 2008). A idade das águas é um importante indicativo em termos de fluxo, pois está associada ao tempo de residência destas no aquífero: águas mais jovens mostram menor tempo de residência, o que indica proximidade entre as áreas de recarga e de descarga, e por isso são

menos mineralizadas. As águas mais antigas mostram maior tempo de residência, suas áreas de recarga e descarga são os divisores e os cursos principais da bacia, e elas tendem a ser mais mineralizadas por permanecerem maior tempo em contato com as rochas do aquífero.

Os isótopos estáveis de oxigênio (^{18}O) e de hidrogênio (^2H) são muito utilizados em estudos de hidrogeologia para diferenciação de fontes de recarga das águas subterrâneas e possíveis misturas entre elas. O sinal isotópico do Oxigênio e Hidrogênio nas águas varia naturalmente, como resultado do fracionamento isotópico destes elementos, e pelo transporte ao qual eles são submetidos no ciclo hidrológico. Por isso a composição isotópica é utilizada em estudos envolvendo águas superficiais e subterrâneas, e a interação entre elas. As concentrações destes isótopos são medidas como $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, que não refletem concentrações absolutas, mas apontam desvios (na unidade por mil) das razões isotópicas com relação a um padrão definido (comumente o SMOW- *Standart Mean Ocean Water*). As razões isotópicas são calculadas como delta de acordo com a equação: $\delta (\text{‰}) = [\text{R}_{\text{amostra}} - \text{R}_{\text{padrão}}] / \text{R}_{\text{padrão}} \times 1000$, sendo que a razão R é expressa pelo quociente entre a concentração do isótopo pesado pelo respectivo isótopo leve.

O fracionamento dos isótopos estáveis ocorre devido a mudanças de fases no ciclo hidrológico, como evaporação, condensação e fusão. Este processo de fracionamento resulta em uma composição isotópica específica da água, que indica a sua fonte (Clark e Fritz, 1997).

Em geral estes dados são plotados em gráficos de $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e os resultados das amostras de águas do aquífero em estudo são comparados com as retas da água meteórica global ou local e os desvios interpretados a partir de processos físicos que incluem evaporação prévia à infiltração da água no aquífero, interação água-rocha com hidratação de minerais ou ainda, misturas de águas fósseis com águas de circulação moderna ou sub-moderna.

Assim, quando o sinal isotópico das águas de uma determinada porção de uma unidade hidroestratigráfica é muito distinto de outra porção, pode-se inferir que se trata de bacias ou sub-bacias hidrogeológicas distintas.

Análise de Lineamentos Estruturais

A análise de lineamentos é uma técnica útil na delimitação de bacias hidrogeológicas, considerando que frequentemente a assimetria entre bacias superficiais e subterrâneas é causada pela presença de estruturas geológicas de grande porte, tais como falhas regionais, zonas de cisalhamento ou dobras. As falhas e fraturas muitas vezes causam a inversão do fluxo subterrâneo, pelo fluxo lateral das águas de infiltração em direção às zonas de maior condutividade hidráulica causada pela “zona de dano” destas estruturas.

A análise de lineamentos fornece informações a partir de imagens orbitais ou fotografias aéreas a respeito de estruturas como zonas de falhas ou de fraturas. Ao longo destas estruturas o

conjunto de rochas subjacentes às coberturas de solos apresentam maior condutividade hidráulica que suas porções laterais. A drenança vertical ao longo de lineamentos regionais (principalmente aqueles situados em regiões de relevo aplainado) causa o rebaixamento localizado da superfície potenciométrica, o que, resulta na diferenciação de sub-bacias hidrogeológicas, pois estas feições são responsáveis pela mudança do sentido do fluxo.

Além dos traços das estruturas, seu mergulho também é importante, pois a água que drena através do plano das estruturas tenderá a migrar para a direção do seu caimento, resultando na mudança do sentido do fluxo considerado regional, e causando assimetria com relação às bacias hidrográficas sobrepostas.

3.2 Assimetria entre Limites Superficiais e Subterrâneos

Em muitos casos os limites projetados na superfície do terreno que delimitam as bacias hidrográficas e as bacias hidrogeológicas não são coincidentes. Esta falta de sobreposição entre os limites foi denominada por Arraes (2007) de assimetria entre as bacias superficial e subterrânea.

Diversos fatores podem ser responsáveis pela divergência entre os limites das bacias superficiais e subterrâneas, sendo os principais: padrão de relevo na superfície, estruturas geológicas, anisotropias em sistemas fraturados e cársticos, heterogeneidades, aquíferos com diferentes tipos de porosidades sobrepostos.

Assimetria Causada pela Presença de Estruturas Geológicas

A presença de estruturas geológicas como dobras, zonas cataclásticas ou falhas pode ser responsável pela alteração da dinâmica de fluxo no meio subterrâneo, pois afetam tanto a configuração física do meio, quanto a disposição de camadas litológicas de diferentes propriedades (Figura 3.2).

Uma dobra, por exemplo, que pode gerar a repetição de uma mesma camada que não existiria caso o substrato não estivesse deformado, causando a repetição da unidade hidroestratigráfica e tornando mais complexa o estabelecimento de bacias hidrogeológicas, que inclusive podem ser separadas verticalmente.

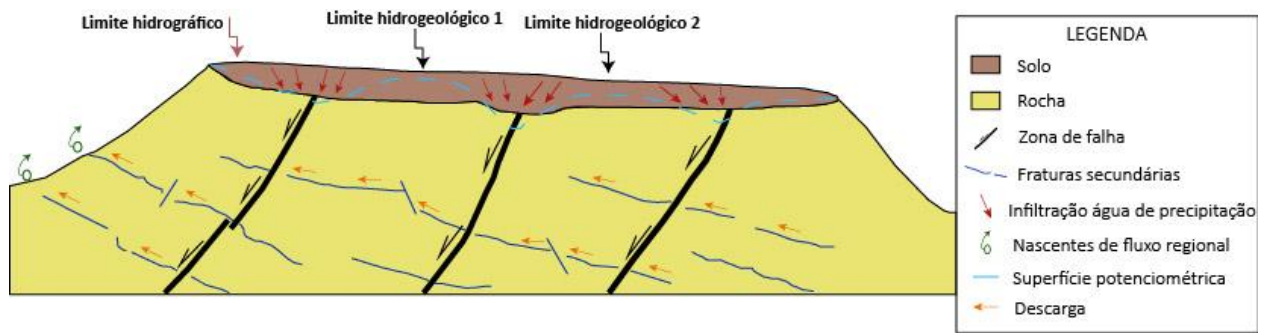


Figura 2.2. Ilustração esquemática demonstrando a influência que estruturas geológicas de grande porte exercem no estabelecimento de assimetrias entre os divisores hidrográficos e hidrogeológicos.

Corniello et al. (2017) observam que a complexa configuração tectônica da área estudada na região de Campania, no sul da Itália, com falhas extensionais associadas à pequenos cinturões cataclásticos de baixa permeabilidade, interfere nitidamente no fluxo de água subterrânea, configurando um grande número de bacias hidrogeológicas distintas.

A presença de anisotropia está associada a diferenças da condutividade hidráulica para as direções representadas pelos eixos coordenados (Feitosa, 1997). Camadas horizontais com menor permeabilidade afetam a velocidade do escoamento vertical, porém não interferem no escoamento horizontal, então a condutividade hidráulica na direção horizontal será maior do que na vertical.

Assimetria em Sistemas Cársticos

No caso de sistemas cársticos ou fissuro-cársticos, as aberturas representadas por estruturas planares primárias (falhas/fraturas) ou por estruturas planares secundárias (geradas por dissolução em carbonatos), podem representar direções de maiores condutividades hidráulicas, em função de propriedades como abertura dos condutos e interconexão entre as estruturas. Na Figura 3 está ilustrada situação em que os divisores hidrográficos e hidrogeológicos não coincidem devido a zona de maior condutividade gerada por sumidouro em um sistema cárstico com mergulho para direção oposta ao escoamento superficial.

Assimetria Causada por Heterogeneidades nos Aquíferos

As heterogeneidades existentes nos meios subterrâneos são uma das causas mais comuns para ocorrência de assimetria entre bacias hidrográficas e hidrogeológicas. Elas podem ser causadas por intercalações entre diferentes unidades hidroestratigráficas, pela presença de camadas impermeáveis ou pouco permeáveis ou pela presença de lentes com amplo contraste de condutividade hidráulica.

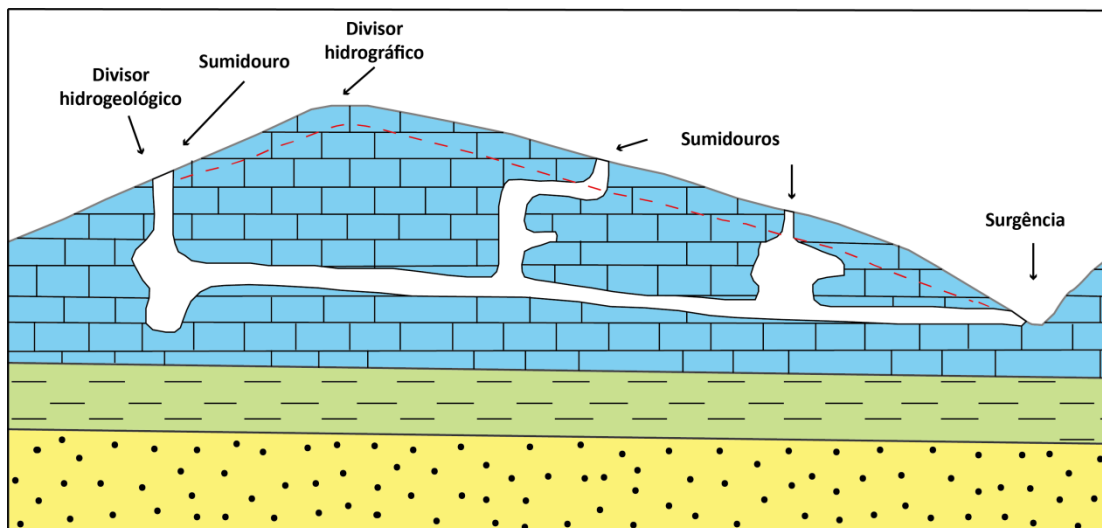


Figura 2.3. Assimetria em sistema cárstico com presença de sumidouros que representam zonas de maior condutividade hidráulica. A linha pontilhada em vermelho representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de Arraes e Campos (2007).

No exemplo mostrado na Figura 2.4 a assimetria se deve à presença da camada impermeável na base do aquífero além de seu mergulho. O arranjo das camadas resulta em um aumento de gradiente hidráulico que desloca o limite hidrogeológico em relação ao limite hidrográfico. Neste exemplo, mesmo considerando que as duas bacias hidrográficas tenham a mesma área de drenagem, as vazões de base da drenagem 2 deverá ser maior que a observada na drenagem 1.

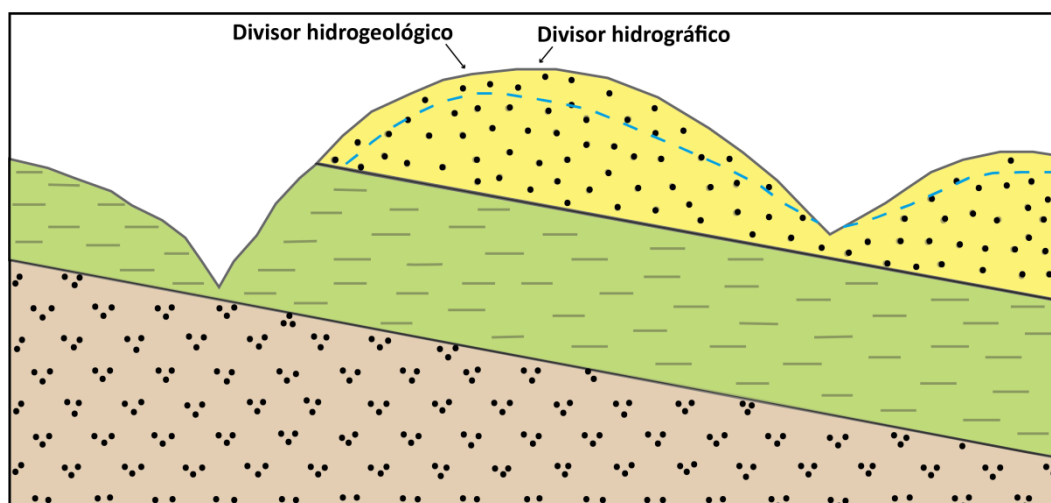


Figura 2.4. Caso em que há assimetria entre os limites hidrográficos e hidrogeológicos causada por presença de camada impermeável de folhelho sob um aquífero livre composto por arenito. A linha tracejada em azul representa a superfície potenciométrica do sistema aquífero. Modificado de Arraes e Campos (2007).

Assimetria Controlada por Feição Geomorfológica

Estruturas geográficas regionais como serras alinhadas (ex.: Serra Geral de Goiás), platôs regionais (ex.: Serra de Caldas Novas), bordas de chapadas (ex.: limite norte da Chapada

Contagem no Distrito Federal), mesas regionais (ex.: Serra da Água Morna na região de Posse, GO), dentre outras, comumente determinam a assimetria entre as bacias superficial e subterrânea em sua porção de terminação lateral, como pode ser observado na Figura 2.5. O controle é vinculado à elevada energia potencial que resulta no rápido rebaixamento da superfície potenciométrica do aquífero em direção ao compartimento de relevo rebaixado.

A rápida ruptura da superfície potenciométrica causa o deslocamento do limite hidrogeológico no sentido oposto ao da quebra abrupta do relevo. No contexto mais comum o limite hidrográfico fica situado próximo ao contorno do compartimento geomorfológico ou da estrutura elevada regional (serra, platô, crista, etc.).

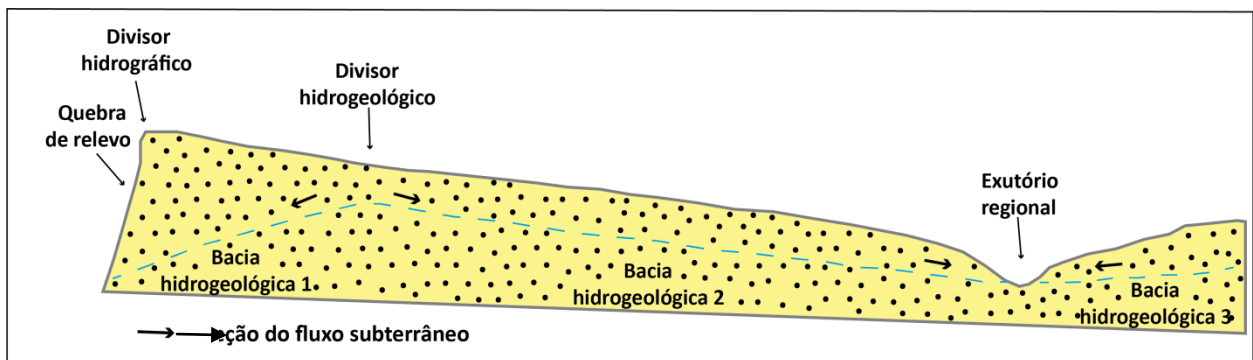


Figura 2.5. Assimetria causada por acentuada quebra de relevo. Observar este caso, no qual uma mesma bacia hidrográfica comporta três bacias hidrogeológicas subjacentes. Modificado de Arraes & Campos (2007).

2.3 Implicações e Aplicações

O conhecimento da delimitação das bacias hidrogeológicas é importante para várias aplicações práticas, além de ser um dos critérios para a própria definição do aquífero ou sistema aquífero. A seguir é mostrado de forma sucinta, e em alguns casos com uso de exemplos, as principais implicações e aplicações dos limites das bacias hidrogeológicas em estudos relativos aos recursos hídricos.

Gestão Integrada de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos

A implantação de estratégias de gestão de águas subterrâneas, no que diz respeito à susceptibilidade dos aquíferos a contaminação por elementos presentes nos solos ou nas águas, requer que sejam estabelecidos os limites individuais das bacias e sub-bacias hidrogeológicas. Considerando uma situação em que haja assimetria entre os limites hidrográficos e hidrogeológicos, a área susceptível a contaminação das águas do aquífero pode ser consideravelmente maior do que o esperado a partir de apenas análises da dinâmica superficial, em imagens aéreas e de satélites.

Ainda, os recursos superficiais e subterrâneos devem ser tratados como uma só unidade quando se refere à gestão integrada de ambos, não é possível gerir as águas subterrâneas sem levar em consideração as origens de suas recargas, o uso do solo em superfície, e vice-versa, é necessário compreender as áreas de descarga, quais rios são alimentados e inclusive mantidos em regime perene ou intermitente pelas águas provenientes dos reservatórios subterrâneos, quais são efluentes e quais são influentes. Todos os aspectos mencionados são afetados em alguma medida pela dinâmica de fluxo em subsuperfície, e como este se conecta com aquele em superfície.

Portanto, a determinação da conexão hidráulica entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos é uma premissa importante para a gestão integrada, visando à preservação de ambos os recursos. Quando não há conexão entre os rios e os aquíferos mais profundos, a gestão poderá ser realizada em separado, uma vez que se trata de reservatórios segmentados.

Aquíferos Transfronteiriços

Mundialmente já foram identificados cerca de 600 aquíferos transfronteiriços, segundo publicação de Villaseñor e Megdal (2021). Porém, destes 600 aquíferos, apenas 6 possuem acordos binacionais ou multinacionais formais de cooperação para o uso e a gestão da água subterrânea presente em tais reservatórios compartilhados.

O mesmo artigo citado anteriormente traz uma comparação entre os números de acordos existentes para a manutenção das reservas e uso de águas subterrâneas, e aqueles para águas superficiais, cuja unidade básica de gestão é a bacia hidrográfica. A diferença é marcante, e os autores atribuem tal fenômeno à falta de capacidade das instituições para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, à ausência de dados ou incongruência com relação à dificuldade de se avaliar as reservas de água subterrânea, ao contrário dos recursos hídricos superficiais que podem ser observados e analisados diretamente.

A avaliação e o estudo dos sistemas aquíferos compartilhados, ou seja, as pesquisas científicas básicas e aplicadas, configura uma ferramenta imprescindível para qualquer tipo de acordo visando a melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Também devem ser considerados os aquíferos que ocorrem além dos limites de unidades da federação, que também configura um tipo de sistema transfronteiriço, uma vez que, no Brasil, a legislação define que a dominialidade das águas subterrâneas é estadual ou distrital, de forma que quando o aquífero transpassa os limites geográficos, os aquíferos devem ser compartilhados pelas duas unidades geopolíticas.

O Programa de Avaliação de Aquíferos Transfronteiriços é uma espécie de força-tarefa entre os Estados Unidos e o México, com o objetivo de estudar aquíferos compartilhados ao redor do mundo e analisar os acordos estabelecidos por outras nações. O programa ainda visa

estabelecer cooperação binacional robusta para a elaboração de diretrizes para gerir os recursos hídricos subterrâneos da região compartilhada entre os dois países, levando-se em consideração os aquíferos como unidade fundamental de análise. Neste sentido, foi autorizado o estudo dos aquíferos Santa Cruz e São Pedro, compartilhados entre o estado do Arizona (EUA) com Sonora (México), e dos aquíferos Mesilla e Hueco Bolson, compartilhados entre Texas e Novo México (EUA) com Chihuahua (México).

A elaboração de planos de gestão dos recursos hídricos em situações de aquíferos que são transfronteiriços entre dois ou mais estados (ou países) também é uma das aplicações de maior relevância no tema de gestão. Este é um assunto sensível e que necessita de embasamento científico, tanto para práticas de exploração e uso da água subterrânea pelos estados envolvidos, quanto para atribuições de responsabilidades com relação à sobreexploração do aquífero por bombeamento desordenado, e desenvolvimento de atividades que possam levar à contaminação do solo e conseqüentemente das águas subjacentes.

Estudos de Remediação in situ de Aquíferos Contaminados

A determinação de bacias e sub-bacias hidrogeológicas, principalmente aquelas controladas por lineamentos, é essencial na investigação de aquíferos contaminados. O padrão de fluxo subterrâneo é determinante para o entendimento da interação entre contaminante e meio subterrâneo, intergranular, fissural ou físsuro-cárstico, além é claro das características intrínsecas da substância química de interesse em si. A presença de bacias de menor ordem pode explicar mudanças no padrão de dispersão das plumas de contaminação, mudança no sentido de fluxo do contaminante ou até mesmo a presença de barreiras laterais ao fluxo. A divisão da pluma formando um padrão lobular é comumente vinculada à existência de sub-bacias hidrogeológicas nos sítios contaminados, por exemplo.

Além disso, um modelo conceitual de fluxo acurado é indispensável nas etapas de investigação confirmatória, direcionando inclusive os próximos passos a serem tomados nas etapas de tomada de decisão, como definição dos pontos a serem amostrados nas zonas vadosa e saturada. A caracterização do meio como um todo é importante, não apenas nas etapas de investigação e definição da contaminação, mas também para os planos de remediação.

Proteção de Aquíferos

Mundialmente falando, as águas subterrâneas praticamente não possuem legislação própria e específica no que se refere a sua proteção contra possíveis contaminações, usos inadequados que podem levar a sobreexploração, ou intrusão da cunha salina em casos de aquíferos costeiros, entre outros riscos aos quais estes recursos finitos estão frequentemente expostos.

O cenário de regulamentação das águas subterrâneas se revela ainda mais crítico quando comparado à legislação existente para as águas superficiais. O artigo publicado por Toscano et al. (2008), *Uma Síntese Analítica sobre Legislação de Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil*, aborda a questão mencionada.

Toscano et al. (2008), em uma análise realizada a respeito da legislação de proteção das águas subterrâneas no Brasil, compararam brevemente o que já havia no país na época de elaboração do artigo, 2008, com as leis existentes em nações como Estados Unidos e países da Europa, e foi observado que estes últimos dispunham de normas que definem critérios de delimitação de perímetros de proteção, com estabelecimento de restrições e controle de uso do solo, diferentemente do que ocorria no Brasil na época. Ainda, Toscano et al. (2008) relataram que apenas 6 estados brasileiros possuíam leis específicas referentes à proteção das águas subterrâneas, e 5 estados incluíam o assunto apenas nas Políticas Estaduais de Recursos Hídricos.

No cenário brasileiro, o sistema federal de meio ambiente dispõe de alguns documentos legais, como a Resolução N° 396 do CONAMA (CONAMA, 2008), que abordam questões específicas referentes à proteção das águas subterrâneas, como perímetros de proteção de poços de abastecimento, áreas de restrição e controle do uso da água subterrânea, e áreas de proteção de aquíferos. Cabe ressaltar, que foi apenas com a constituição de 1988 (Brasil, 1988) que a água subterrânea deixou de ser enquadrada como recurso mineral de subsolo pertencente à União (Art. 176), e passou à categoria de bem público de propriedade dos Estados e do Distrito Federal (Art. 26, I).

Quantificação de Reservas Hídricas Subterrâneas

A área de distribuição lateral de um aquífero é um dos principais parâmetros que deve ser considerado para os cálculos ou estimativas de reservas hídricas contidas nos aquíferos. Todas as equações propostas para estimativa das reservas hídricas (Costa, 1998) de um aquífero e suas adaptações para diferentes aquíferos, ou o uso do balanço hídrico para este mesmo fim, requerem o conhecimento da área de distribuição dos sistemas.

Desta forma, quando se desconsidera as eventuais assimetrias existentes entre as bacias superficiais (hidrográficas) e subterrâneas (hidrogeológicas), erros significativos podem ser gerados e propagados nos diferentes cenários.

Campos e Almeida (2012) estimaram as reservas hídricas subterrâneas dos aquíferos termais da região de Caldas Novas, no estado de Goiás e as áreas dos diferentes reservatórios subterrâneos foram determinadas a partir da proposição prévia dos limites das bacias hidrogeológicas. Junqueira (2020) apresentou as estimativas de reservas hídricas dos sistemas aquíferos termais da região da Chapada dos Veadeiros, estado de Goiás e os resultados foram

considerados preliminares, uma vez que as bacias hidrogeológicas ainda não têm seus limites minimamente definidos nesta região.

Caracterização de Modelos Conceituais de Aquíferos

A caracterização conceitual de aquíferos envolve todos os diferentes aspectos referentes ao meio físico, a dinâmica de fluxo subterrâneo, a interação entre o meio superficial e subsuperficial, a determinação do balanço hídrico nos diferentes compartimentos que compõem o ciclo hidrológico como um todo, a identificação e caracterização das áreas de recarga e descarga, a compreensão da espessura e parâmetros da zona vadosa, dentre outros aspectos.

Assim, para que seja elaborado um modelo conceitual de um aquífero, os meios superficiais e subsuperficiais devem ser caracterizados. Essa caracterização deve especificar o tipo de solo, sua textura, estrutura, conteúdo de matéria orgânica, espessura aproximada da zona vadosa, condutividade hidráulica, definição da rocha-mãe e descrição dos horizontes. Depois de realizada a caracterização dos solos, é importante a compreensão do balanço hídrico nos diferentes compartimentos envolvidos na transferência de água, com entendimento do padrão tempo-espacial da precipitação, da sua parcela que sofre evapotranspiração e interceptação pela vegetação no local, o montante que atinge o substrato, qual a proporção que alimenta o escoamento superficial, qual proporção infiltra no solo e supre a capacidade de campo do meio, e qual parte de fato caracteriza recarga para o aquífero.

Com a definição da proporção entre o que escoa superficialmente e o que infiltra no meio subterrâneo, define-se os montantes do fluxo interno e de base. Em seguida, pode-se a partir de dados potenciométricos definir se há assimetria entre os limites da bacia hidrográfica e hidrogeológica, e ainda dividir as sub-bacias hidrogeológicas. Por fim se caracteriza as áreas de recarga regionais de descarga do fluxo de base e conexão com o mar, no caso de aquíferos costeiros.

Simulação Numérica de Fluxo

Toda a análise apresentada no item anterior pode compor e aprimorar um modelo conceitual de aquífero, que da forma como foi apresentado seria um modelo qualitativo. Para a elaboração de modelos quantitativos é necessário o uso dos parâmetros hidrodinâmicos, os quais serão utilizados como dados de entrada em softwares de modelagem numérica, como SWOT, FEFLOW ou MODFLOW. Um dos principais conjuntos de dados de alimentação dos modelos numéricos de aquíferos são os limites dos sistemas, que compõem as condições de contorno da simulação, os quais são representados pelos próprios limites das bacias hidrogeológicas. Estes dados, em última análise, são responsáveis pela maior ou menor sensibilidade da modelagem ou mesmo pela coerência dos resultados.

Os dados de áreas dos aquíferos são obtidos a partir da modelagem em ambiente de geoprocessamento da projeção dos aquíferos dentro dos limites da bacia hidrográfica. Este método é coerente quando as bacias subterrânea e superficial apresentam a mesma delimitação. Para os casos de assimetria a área não pode ser calculada diretamente, mas apenas pode ser definida após uma análise que demonstre os limites das bacias sobrepostas.

As simulações numéricas podem ter grande imprecisão, quando realizadas em áreas limítrofes em as bacias hidrográficas e hidrogeológicas não são coincidentes. O mesmo pode ocorrer para casos em que as bacias subterrâneas e superficial são desconectadas.

Um dos maiores problemas durante a elaboração de um modelo de fluxo de água subterrânea que se propõe a representar a configuração hidrogeológica de um aquífero ou bacia hidrogeológica específica é a proposição de um modelo conceitual que de fato se assemelhe à realidade (Demiroglu, 2016). A precisão de um modelo conceitual está intrinsecamente relacionada ao uso de dados de entrada igualmente acurados e detalhados. Apenas desta forma os dados de saída, que incluem a simulação e a análise de sensibilidade, poderão ser confiáveis (Demiroglu, 2016).

Enquadramento das Águas Subterrâneas

A Resolução CONAMA 396/2008 trata da classificação e diretrizes ambientais referentes ao enquadramento das águas subterrâneas e demais providências. Inicialmente são feitas considerações relevantes para o propósito de aplicação da resolução, dentre as quais se destacam: i) enquadramento dos corpos de água segundo classes será realizado de acordo com as características hidrogeológicas dos aquíferos e os seus usos respectivos; ii) consideração importante de que “os aquíferos se apresentam em diferentes contextos hidrogeológicos e podem ultrapassar os limites das bacias hidrográficas, e que as águas subterrâneas apresentam características físicas, químicas e biológicas intrínsecas, com variações hidrogeoquímicas, sendo necessário que as suas classes de qualidade sejam pautadas nessas especificidades” e iii) consideração que questões relacionadas a prevenção e controle de poluição estão associadas aos usos e classes de qualidade das águas que são exigidos para determinado corpo hídrico subterrâneo.

Os pontos enumerados são algumas das considerações realizadas na resolução antes da introdução específica das classes definidas para o enquadramento das águas, e foram destacados aqui porque demonstram a importância e relevância da caracterização correta do contexto hidrogeológico da área, além da análise integrada entre o contexto hidrogeológico e hidrográfico. E todos estes pontos perpassam pela definição dos limites das bacias hidrogeológicas, e entendimento se há ou não assimetria entre estes limites e os das bacias hidrográficas.

Neste aspecto é importante ressaltar que o enquadramento é aplicado a parte de uma bacia ou sub-bacia hidrogeológica, e o conhecimento de seus limites será fundamental para delimitar as áreas do aquífero com as mesmas classes. Os usos que causam a degradação da qualidade das águas subterrâneas podem ocorrer em pontos localizados, mas a dispersão da contaminação na forma de uma pluma pode afetar outras porções do aquífero que esteja na mesma bacia hidrogeológica, por isso, a definição dos seus limites é fundamental.

4. CONCLUSÕES

As bacias hidrográficas apresentam exutório representado por um ponto, isto é, toda a água afluente em um ponto de observação é drenada a partir da área total de drenagem situada a montante. As bacias hidrogeológicas comumente têm exutórios representados por uma área, isto é, a descarga dos aquíferos se dá em uma seção do aquífero e não apenas em um ponto.

A determinação do limite de uma bacia subterrânea deve ser apoiada em diferentes bases de dados, incluindo: potenciometria, estudo de estruturas geológicas, informações hidrográficas, bases hidroquímicas e isotópicas, além de documentação complementar (imagens de satélite, mapas geomorfológicos, modelos digitais de elevação, dentre outros).

A assimetria entre os limites de bacias hidrográficas e as bacias subterrâneas sotopostas pode ser determinada por diferentes controles, incluindo: relevo, anisotropias, estruturas geológicas, heterogeneidades dos aquíferos dentre outras.

O conhecimento dos limites das bacias hidrogeológicas e sua relação com as bacias hidrográficas sobrepostas são importantes para diferentes estudos aplicados aos aquíferos com destaque para: aquíferos transfronteiriços, gestão integrada de recursos hídricos, remediação de aquíferos contaminados, estudos de simulação numérica de fluxo, dentre outras implicações.

As relações entre as bacias hidrográficas e subterrâneas apresentam maior relevância nos casos em que há efetiva conexão hidráulica entre o aquífero e os cursos d'água superficiais. Nos casos de aquíferos confinados ou aquíferos fraturados profundos em regiões com relevo pouco pronunciado, a separação física dos reservatórios subterrâneo e superficial permite que os limites sejam tratados como simétricos.

5. REFERÊNCIAS

- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(1):81-89. 2007.
- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. Aplicação de ensaio de traçador e dados de potenciometria como ferramentas para a delimitação de bacias hidrogeológicas. *Geociências (São Paulo. Online)*, **29**:623-631. 2010.
- ARRAES, T.M. Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas. Dissertação (Mestrado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília,

- Brasília. 125p. 2008.
- CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. Balanço térmico aplicado à recarga artificial dos aquíferos da região de Caldas Novas, estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* **42**(1):196-207. 2012.
- CLARK, I. D.; FRITZ, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, Jul 23, 1997 – Science – 352 pages.
- CNRH 2001. *Resolução nº15, de 11 de janeiro de 2001*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 22 de janeiro de 2001.
- CNRH 2002. *Resolução nº22, de 24 de maio de 2002*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 04 de julho de 2002.
- CONAMA 2001. Resolução CONAMA nº279, de 27 de Junho de 2001. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 29/06/2001.
- CONAMA 2008. Resolução CONAM nº396, de 3 de Abril de 2008. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 7/04/2008.
- CORNIELLO A.; DUCCI, D.; MONTI, G.M. *An integrated approach for the delimitation of a groundwater basin: the case study of the Conca di Acerno (Campania, southern Italy)*. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue 1*. 2017
- COSTA, W.D. Uso e gestão de água subterrânea. In: Feitosa, F.A.C; Manoel Filho. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2a ed. Rev. e Ampl. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ. p. 341-367. 2000.
- DEMIROGLU, M. Identifying the groundwater basin boundaries, using environmental isotopes: a case study. 2016.
- FEITOSA, E.C. Pesquisa de Água Subterrânea. In: A.C.F. Feitosa & J. Manoel Filho (ed.) *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*, Fortaleza, CPRM/LABHID, 53-80. 1997.
- FEITOSA, A.C.F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMÉTRIO, J.G.A. (Coord.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM/LABHID. Rio de Janeiro. 3a ed. Ampliada e Revisada. 812p. 2008.
- GUNN, J. Contributory area definition for groundwater source protection and hazard mitigation in carbonate aquifers. *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis, and Mitigation*. *Geol Soc Lond* 279:97-109. 2007.
- JUNQUEIRA, T.P. Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO): estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos. Dissertação (Mestrado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 101p. 2020.
- KOHNKE M.W. Atenuação natural de contaminantes, metodologias para a delimitação do perímetro de proteção de poços (PPP). *ABAS Informa*, S.Paulo, **121**:9-10. 2001.
- LOBO-FERREIRA J.P. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: APRH, Congresso da Água, 4, Lisboa, *comunicações*, 1-16. 1998.
- PALMER, A.N. Understanding the hydrology of karst. *Geol Croat* 63:143-148. 2010.
- PUTRANTO T.T., LUTHFI M.I. Aquifer system, recharge-discharge zone and groundwater basin boundary mapping to support open and transparent water data, case study: Karangobar Groundwater Basin. 2019.
- REBOUÇAS A.C. Água subterrânea no sistema nacional de gerenciamento dos recursos hídricos. *ABAS Informa*, São Paulo, **154**:3. 2005.

- VILLASEÑOR, E.M., MEGDAL, S.B. *The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration*. *Water* 2021, 13, 530. 2021.
- TIEDMAN R.C.; GOODE D.J.; HSIEH P.A. Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain. *Ground Water*, **36**(4):611-621. 1998.
- TOSCANO G.L.G.; SANTOS K.M.; ALMEIDA C.N.; SILVA T.C. Uma Síntese Analítica sobre Legislação de Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2008.
- WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng Geol* 65:85-105.

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Contexto Geológico Regional e Local

A área de estudo - APANRV e vizinhança - está localizada no contexto geológico da Bacia do São Francisco, inserida no cráton de mesmo nome. A área abrange rochas neoproterozoicas pertencentes ao Grupo Bambuí, as quais predominam na área estudada, e rochas fanerozoicas pertencentes ao Grupo Urucuia (Campos & Dardenne, 1997).

As unidades litoestratigráficas conhecidas no contexto da Bacia do São Francisco são: o embasamento (>1.8 Ga), o Supergrupo Espinhaço (Paleo/Mesoproterozoico), o Supergrupo São Francisco, que abrange os grupos Macaúbas e Bambuí (Neoproterozoico), o Grupo Santa Fé (Permocarbonífero) e os grupos Areado, Mata da Corda, e Urucuia, sendo estes três últimos sedimentos de idades cretáceas. Na Figura 2.1 está representada uma coluna estratigráfica simplificada da Bacia São Francisco, com as unidades empilhadas cronologicamente.

3.1.1 Embasamento

O embasamento do Cráton do São Francisco é constituído por rochas granito-gnáissicas com idades mais antigas que 1,8 Ga, que afloram na porção sul da Bacia do São Francisco (Alkmim, 2004), e na porção central do cráton, nas regiões de São Domingos, GO e Correntina, BA.

3.1.2 Supergrupo Espinhaço

O Supergrupo Espinhaço apresenta exposição somente da sua porção superior na maior parte da bacia, com depósitos eólicos e fluviais, além de alternância entre pelitos e arenitos marinhos. Os locais onde este supergrupo se apresenta completamente exposto são restritos à Faixa Araçuai e ao Aulacógeno do Paramirim (Alkmin & Martins Neto, 2001 e Alkmin, 2004).

3.1.3 Supergrupo São Francisco

O Supergrupo São Francisco é a unidade litoestratigráfica com maior extensão em termos de área na bacia, e é composto pelo Grupo Macaúbas na base e pelo Grupo Bambuí, no topo. O contato entre o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Macaúbas é caracterizado por discordância angular, e este grupo é composto por diamictitos, arenitos e pelitos de origem glacio-continental, com transições para ambiente glacio-marinho (Alkmin, 2004). O Grupo Bambuí é caracterizado por rochas carbonáticas e pelíticas, que dão lugar a arcóseos e arenitos à medida que se ascende na estratigrafia, e em direção às bordas da bacia (Dardenne, 1978). Este grupo é composto, de acordo com Dardenne (1978, 1981), pelas formações Jequitaí, Sete Lagoas, Serra de Santa

Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias, da base para o topo, e descritas a seguir.

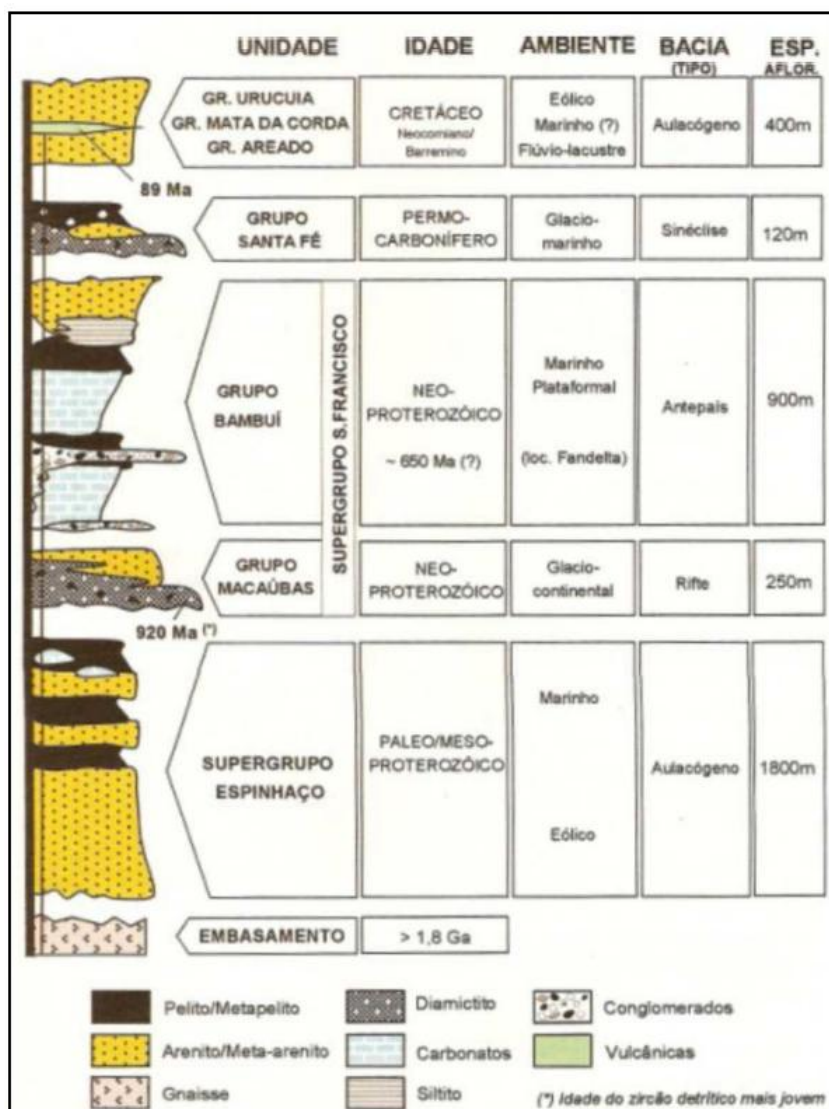


Figura 3.1 - Coluna estratigráfica resumida da Bacia do São Francisco. (Retirado de Agnel 2012, coluna modificada de Alkmim, 2004).

Formação Jequitá

Esta formação foi definida como sendo a base do Grupo Bambuí por Branco e Costa (1961), e definida por Dardenne (1978) como sendo constituída por um conglomerado matriz-suportado, com matriz pelítica esverdeada, onde são encontrados clastos de dimensões contrastantes de quartzito, calcário, dolomito, gnaisses, granitos, rochas vulcânicas, entre outros.

Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas, na Faixa Brasília, é composta por lentes carbonáticas, calcários e dolomitos, intercalados e interdigitados em uma sucessão onde predominam margas e pelitos. As lentes carbonáticas predominam ou constituem horizontes contínuos na região cratônica

estável de Januária, Itacarambi, Montalvânia, no estado de Minas Gerais, e Serra do Ramalho, no estado da Bahia (Dardenne, 1978 e Dardenne & Walde, 1979).

Formação Serra de Santa Helena

A Formação Serra de Santa Helena configura um nível composto por folhelhos e siltitos de coloração cinza a cinza esverdeado, que se localiza entre dois níveis carbonáticos na sucessão do Grupo Bambuí (Dardenne, 1978). Nela é possível observar também, localmente, lentes de calcário cinza escuro.

Formação Lagoa do Jacaré

Esta unidade é composta por lentes de calcários oolíticos e psolíticos alternados, de coloração cinza escuro, com um odor fétido em algumas regiões, e presença de siltitos e margas (Dardenne, 1978).

Formação Serra da Saudade

A Formação Serra da Saudade foi definida por Branco & Costa (1961) como sendo composta por siltitos e argilitos de coloração cinza, com intercalações de camadas mais arenosas. Dardenne (1978) descreve a formação como folhelhos e argilitos de coloração esverdeada, que progressivamente passam para siltitos feldspáticos ou arcoseanos em direção ao topo. E acrescenta ainda que as exposições mais completas desta unidade são observadas nas proximidades da Serra de São Domingos, estado de Minas Gerais.

Formação Três Marias

Constituída por siltitos e arcóseos de coloração verde escuro, segundo Dardenne (1978). Braun (1988) descreve a formação como sendo um conjunto de siltitos, grauvacas líticas e arcóseos com coloração variando de verde a marrom escuro, com intercalações por siltitos calcíferos e siltitos argilosos.

3.1.4 Grupo Santa Fé

O Grupo Santa Fé é datado do Permo-carbonífero, e subdividido nas formações Floresta e Tabuleiro. São sedimentos glaciogênicos que marcam a glaciação gonduânica na Bacia do São Francisco (Campos & Dardenne, 1997).

3.1.5 Grupo Aerado

O Grupo Aerado (Eocretáceo) é dividido em três formações interdigitadas: Abaeté na base, Quiricó e Três Barras no topo. São sedimentos depositados em ambientes fluviais, lacustres ou eólicos. Na porção sul é onde ocorre a maior espessura destes, com cerca de 200 m, enquanto

em direção ao centro e ao norte a espessura alcança até 60 metros, com ocorrências mais descontínuas (Campos & Dardenne, 1997).

3.1.6 Grupo Mata da Corda

O Grupo Mata da Corda (Neocretáceo) ocorre apenas na porção sul da bacia, e é dividido nas formações Patos e Capacete, sendo a primeira caracterizada por rochas vulcânicas alcalinas e a segunda por sedimentos epiclásticos gerados a partir de rochas vulcânicas (Campos & Dardenne, 1997).

3.1.7 Grupo Urucuia

O Grupo Urucuia constitui a unidade mais expressiva em termos de distribuição espacial geográfica na Bacia do São Francisco, com as maiores extensões sendo observadas na porção central-norte da bacia (Gaspar, 2006). Apesar da grande extensão em área, esta unidade é relativamente homogênea, sendo composta basicamente por arenitos que variam na proporção de quartzo e feldspato, e por vezes conglomerados no topo. Ela ocorre de forma contínua na sub-bacia Urucuia, e se estende até o sul do estado do Piauí; na porção sul, Sub-bacia Abaeté, é descontínua e ocorre na forma de mesetas e morros testemunhos (Gaspar, 2006).

A posição estratigráfica desta unidade foi debatida durante muitos anos na literatura, até que Campos (1996) e Campos & Dardenne (1997a) definiram que o Grupo Urucuia é uma unidade separada do Grupo Aerado. Campos (1996) definiu a divisão do grupo nas formações Posse na base, e Serra das Araras no topo.

Contexto Geológico Local da Área de Estudo

A área analisada no presente estudo está inserida na porção oeste da Bacia do São Francisco, a qual se localiza inteiramente no cráton de mesmo nome. Neste contexto, afloram rochas neoproterozoicas do Grupo Bambuí, mais especificamente das formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, rochas neocretáceas do Grupo Urucuia, além de amplas áreas com sedimentos coluvionares, detrito-lateríticos e aluvionares (Figura 3.2).

A Formação Lagoa do Jacaré é representada na área por carbonatos micríticos comumente intercalados com calcarenitos intraclásticos (Figura 3.3A), e por margas de coloração cinza e extensas camadas de siltitos. Os carbonatos ocorrem na área como extensas lentes que apresentam continuidade em subsuperfície, como indica a existência de sistema de cavernas com extensão de até 14 km. Nas imagens aéreas as regiões de ocorrência dos carbonatos são bem distintas, pela vegetação típica que em associação às exposições rochosas apresenta um padrão de baixa reflectância resultando em coloração escura nas imagens orbitais.

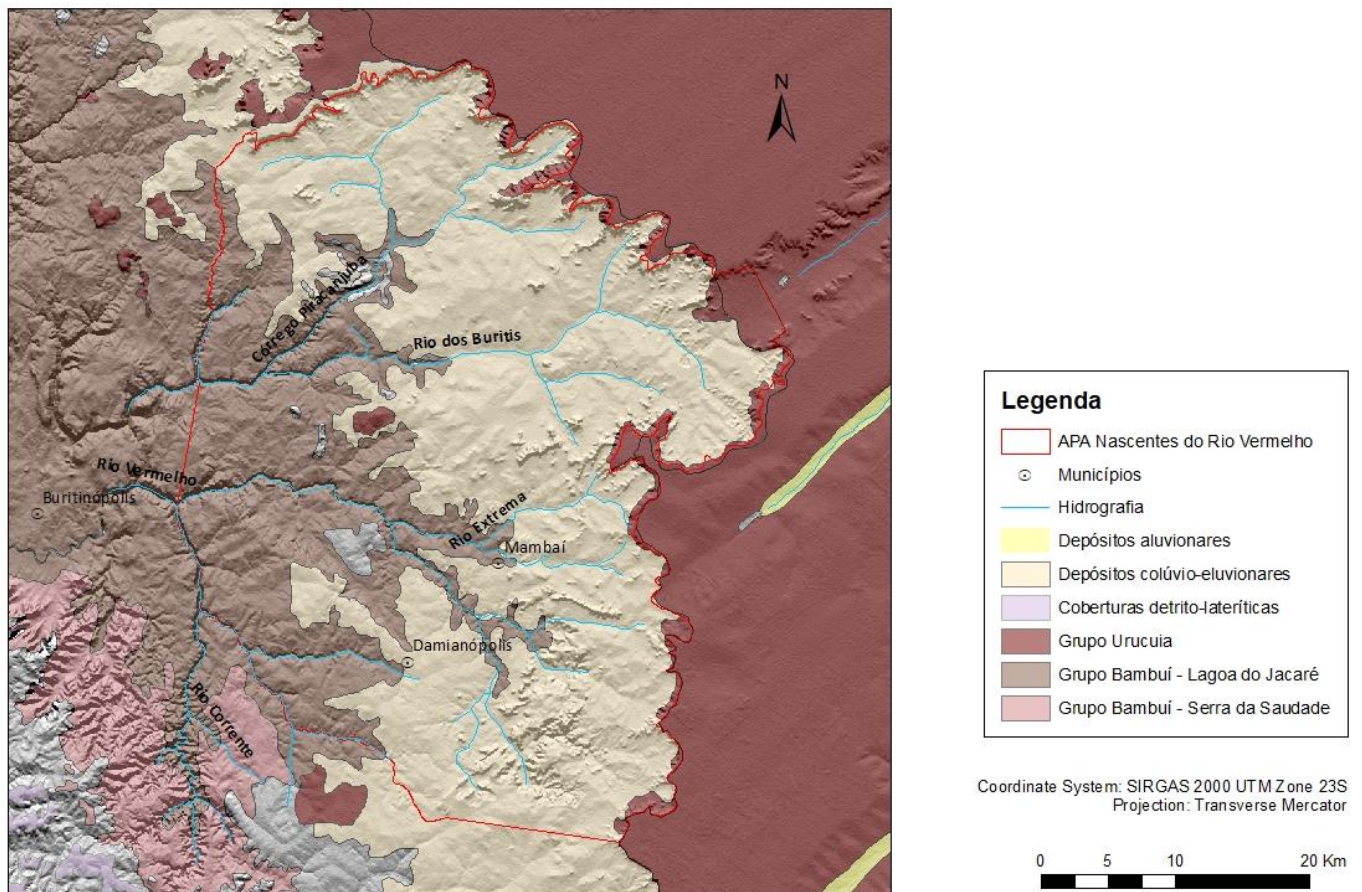


Figura 3.2 - Mapa geológico sobreposto a modelo digital de elevação confeccionado com dados de relevo sombreado. No centro está destacada a APANRV em polígono vermelho, bem como os principais municípios da região e os principais cursos superficiais d'água. Diferenciadas por cores distintas estão as unidades geológicas que ocorrem na área, os depósitos aluvionares, colúvio-eluvionares, coberturas detrito-lateríticas, Grupo Urucuia e Grupo Bambuí, com as formações Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. Fonte Mapa Geológico: CPRM.

No perímetro da APANRV a unidade geológica presente é a Formação Lagoa do Jacaré, descrita na literatura como composta por intercalações e interdigitações laterais e verticais de siltitos com lentes de carbonatos. Em alguns locais mais restritos essas intercalações são regulares e em outras, como na APA, se observam extensas camadas de siltito e margas com lentes carbonáticas frequentemente descontínuas.

O Grupo Urucuia é representado por arenitos de coloração clara, compostos por grãos eólicos bem arredondados e esféricos, com silicificação incipiente. Em outros locais o arenito observado apresenta bimodalidade granulométrica, com grãos de quartzo de dois tamanhos distintos na rocha. São observadas frequentemente estratificações cruzadas em escala de afloramento, como demonstrado na Figura 3.3B.

A Formação Chapadão é a unidade cenozoica que ocorre na forma de coberturas colúvio-eluvionares arenosas principalmente na porção basal da escarpa que define a Serra Geral de Goiás. São materiais arenosos, de coloração clara, restrita presença de matriz fina, sem estruturas sedimentares e não litificados.

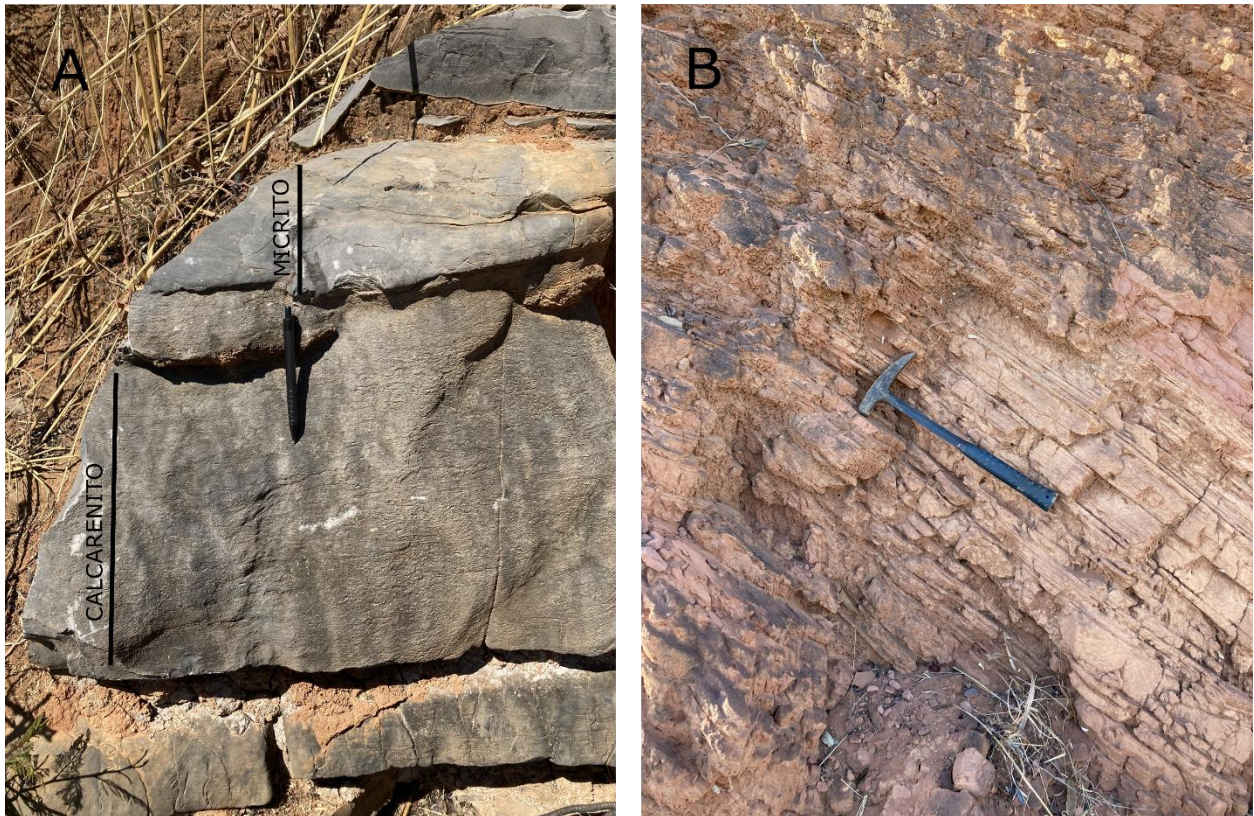


Figura 3.3 – Fotos de campo de afloramentos representativos das unidades da área. **A)** Afloramento de calcário da Formação Lagoa do Jacaré observado em campo em que se pode notar a intercalação entre uma porção de granulometria mais grossa, o calcarenito, e uma porção mais fina, representada pelo micrito. **B)** Afloramento da Formação Posse, do Grupo Urucuia, onde se observa os planos de estratificação menores em uma paleo duna típica desta unidade basal do grupo.

Na área da APA Nascentes do Rio Vermelho foi possível observar com clareza, em trabalhos de campo, regiões de mata ciliar e mata de encosta com coloração mais esverdeada, e manchas pontuais em que a vegetação se torna mais esparsa e seca, onde se concentram as barrigudas, árvores típicas de áreas carbonáticas que apresentam escassez pronunciada de água (áreas de mata seca). À medida que se aproxima das regiões mais a leste da área, em direção à fronteira com o oeste do estado da Bahia, os terrenos desmatados para criação de gado e plantio de lavouras dominam gradativamente mais a paisagem, na área de ocorrência dos colúvios cenozoicos, como pode ser observado na imagem obtida do *GoogleEarth* (Figura 3.4). Os pastos são as áreas representadas pela maior reflectância que predominam na porção oriental da APA.

Em direção a leste, no estado da Bahia, o padrão de uso é modificado, sendo que o sistema de plantio de monoculturas de grãos em grandes áreas passa a predominar. Esta mudança do padrão de uso é facilitada pelo relevo com padrão plano a suave ondulado, e pela presença predominante de latossolos.

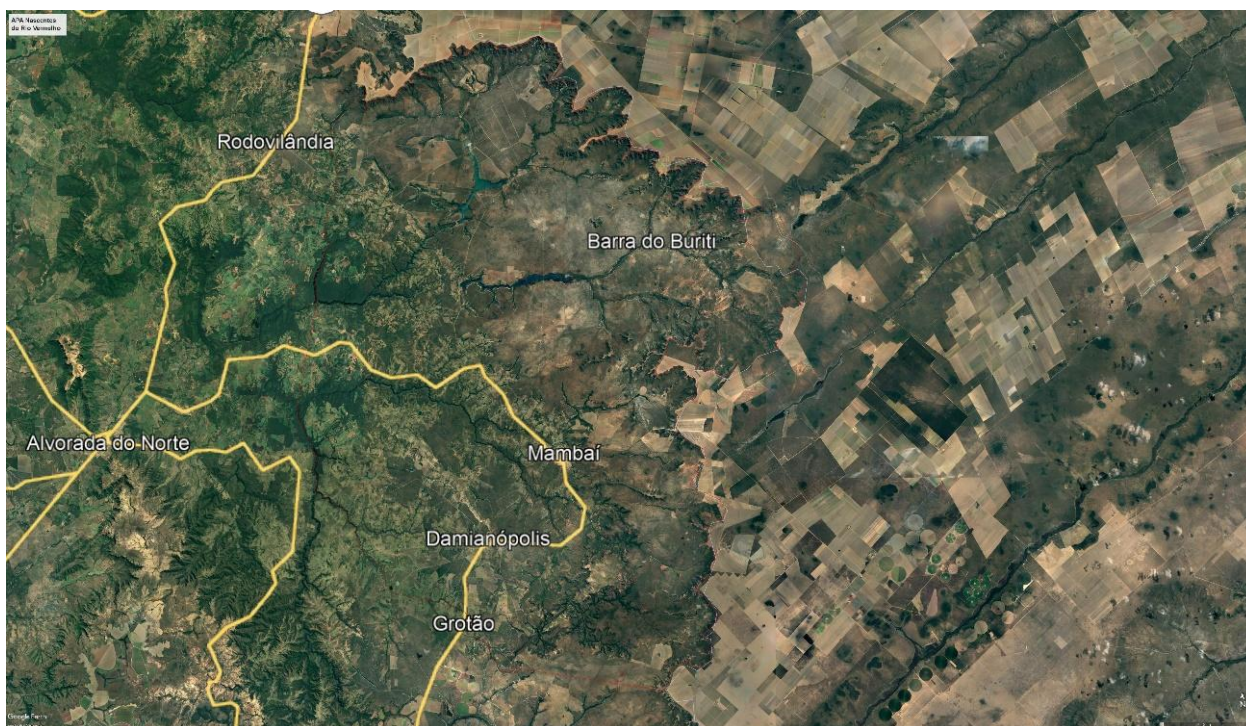


Figura 3.4 - Imagem de satélite obtida do sistema *GoogleEarth Pro*, com as sedes dos principais municípios destacados, além dos diferentes padrões de ocupação das terras. Na porção leste da imagem, em coloração mais esbranquiçada, observa-se o domínio do Grupo Urucua, no extremo oeste do estado da Bahia, Município de Jaborandi.

3.2 Pedologia

Na área de estudo ocorrem latossolos, nitossolos, argissolos, neossolos litólicos e cambissolos. De acordo com dados de sistemas de informações dos estados de Goiás e da Bahia, os tipos de solo predominantes na região são os latossolos, seguidos pelos cambissolos e argissolos, e por fim os neossolos (quartzarênicos e litólicos) e gleissolos. A seguir é apresentada breve descrição de cada uma dessas classes de solo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2018).

Neossolos

São solos pouco desenvolvidos, com horizonte A composto por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, sem qualquer presença de horizonte B diagnóstico (Figura 3.5).

Neossolos litólicos, o tipo predominante na área de estudo, são solos definidos como possuindo contato lítico ou lítico fragmentário inserido nos 50 cm iniciais a partir da superfície, com horizonte A ou horizonte hístico localizado imediatamente acima da rocha ou acima do horizonte C, ou ainda, sobre material com percentual de 90% ou mais de sua massa constituída de fragmentos líticos grossos (diâmetro maior que 2 mm). A sequência de horizonte mais comumente observada é: A → AC → C → R.



Figura 3.5 - Perfil de Neossolo Litólico desenvolvido sobre siltitos da Formação Lagoa do Jacaré. Notar a ausência de horizonte B, em que o horizonte superficial A ocorre imediatamente sobre horizonte saprolítico C e este sobre rocha pouco alterada (pelito fraturado do Grupo Bambuí).

Cambissolos

Solos constituídos por minerais preservados com presença de horizonte B incipiente acima de qualquer horizonte superficial (exceto hístico) ou de horizonte A chernozêmico desde que o horizonte B incipiente apresente argila de alta atividade e alta saturação por bases. A sequência de horizontes diagnóstica é representada pela sucessão: A → Bi → C → R (Figura 3.6).

Argissolos

Argissolos são solos com presença de minerais preservados, necessariamente com presença de horizonte B textural abaixo do horizonte A ou E, com presença de argila de baixa atividade ou de alta atividade, mas associada a baixa saturação por bases ou caráter aluminoso predominante no horizonte B. Ainda, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, se cumpridos os requisitos acima, a eventual presença de horizonte plântico não preenche os critérios para Plintossolos, assim como a eventual presença de horizonte glei não o torna um Gleissolo. Os horizontes se organizam da seguinte ordem: A (±E) → Bt → C → R (Figura 3.7).



Figura 3.6 - Perfil de Cambissolo Háplico desenvolvido sobre siltitos da Formação Serra da Saudade. O horizonte B incipiente é rico em matéria orgânica e bastante estruturado.



Figura 3.7 - Perfil de Argissolo Vermelho eutrófico, desenvolvido sobre calcários e margas da Formação Lagoa do Jacaré. A estruturação granular grossa é comum nos horizontes superficiais. A cerosidade é observável a olho nu, até os 60 cm do perfil. Os fragmentos de rocha carbonática representam a rochividade que é comumente observada nos solos podzolizados desta região.

Latossolos

São solos constituídos por material mineral, com presença de horizonte B latossólico e horizonte A de qualquer tipo, desde que dentro dos 200 cm iniciais a partir da superfície do solo. A sequência de horizontes típica é: A → Bw → C → R. Na região estudada estes solos dominam a região oeste da Bahia, sendo a classe de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura média a arenosa a mais comum (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, desenvolvido sobre arenitos da Formação Posse do Grupo Urucuia. A estruturação é pouco desenvolvida, em um perfil com textura arenosa.

Gleissolos

Solos constituídos de material mineral com horizonte glei formado a partir dos primeiros 50 cm da superfície do solo ou ainda entre os 50 e 150 cm desde que localizado imediatamente abaixo de horizonte A ou E, ou de horizonte hístico (de espessura menor que 40 cm, insuficiente para caracterizar Organossolo).

3.3 Geomorfologia

A paisagem da região estudada é caracterizada por dois compartimentos geomorfológicos que são divididos por uma cuesta. Um dos compartimentos situado na porção centro-leste, é denominada Chapadão Central e se insere sobre os arenitos do Grupo Urucuia, com interpretação de que é um remanescente da superfície Sulamericana; a porção centro-oeste, denominada de Vão do Paranã, se estabeleceu sobre as rochas do Grupo Bambuí. Ao longo da cuesta é possível

observar também morros testemunhos, e no seu sopé localizam-se depósitos colúvio-eluvionares arenosos, resultantes do intemperismo e erosão dos arenitos do Grupo Urucua durante o Cenozoico (Cherem e Varajão, 2014). Estes depósitos são atribuídos à Formação Chapadão.

3.4 Clima

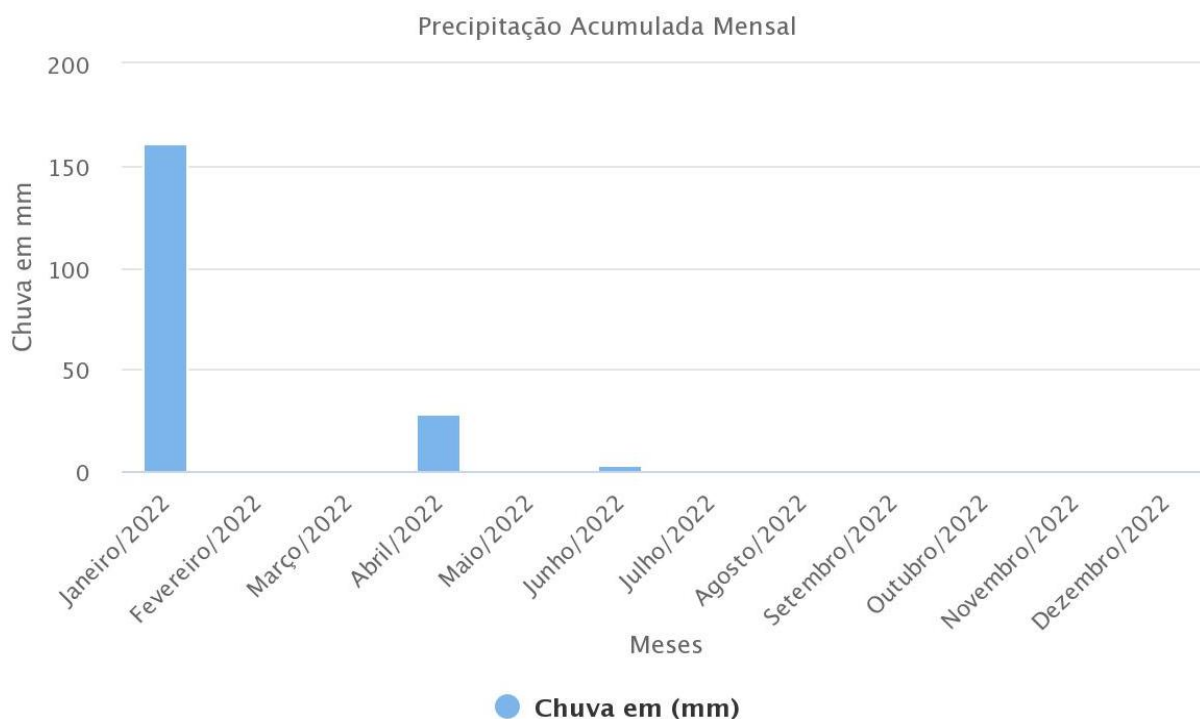


Figura 3.9 - Gráfico do acumulado mensal da pluviosidade medida durante o ano de 2022. Valores de precipitação em mm. Estação: PCH Riachão Jusante (ANA - D7967). Fonte: INMET.

O clima na área de estudo é caracterizado como tropical com forte caráter sazonal, onde são bem definidas duas estações, inverno seco, que se estende de Maio a meados de Setembro, e verão chuvoso, compreendendo o período de Outubro a Abril. Cerca de 95% da chuva que precipita no decorrer de um ano se concentra nos meses da estação chuvosa, principalmente em Janeiro. No gráfico da Figura 3.9 estão representados os acumulados mensais de precipitação para o ano de 2022, medidos na PCH Riachão Jusante, localizada no interior da APANRV. No ano hidrológico em questão o máximo de pluviosidade medido foi cerca de 160 mm, em Janeiro/2022. Em Abril/2022, esse valor ficou em cerca de 25 mm, o que mostra a ampla variabilidade da precipitação na região mesmo no período chuvoso.

3.5 Hidrografia

Hidrograficamente, a região está majoritariamente inserida na bacia do rio Tocantins, com pequena porção a leste localizada na bacia do rio São Francisco, cujas nascentes partem da Serra Geral de Goiás, a qual constitui o divisor regional das águas de superfície (Chaves *et al.*, 2006).

Os principais cursos d'água da região são os rios Buritis e Extrema, que nascem no Grupo Urucuia a leste da área de estudo. O rio Extrema é tributário do rio Vermelho a oeste, e a leste se encontra com o Rio Corrente, no extremo oeste da área delimitada como APA das nascentes do rio Vermelho. O rio Piracanjuba também apresenta nascentes nas áreas de ocorrência e distribuição do Grupo Urucuia, e a oeste se une ao rio Buritis, que é um afluente direto do rio Corrente.

3.6 Contexto Hidrogeológico

Sistema Aquífero Urucuia

O Sistema Aquífero Urucuia ocorre na região do oeste do estado da Bahia, e se estende desde o extremo sul do Maranhão e Piauí até o extremo noroeste do estado de Minas Gerais. A oeste é limitado pela Serra Geral de Goiás que segue até o sudoeste do Tocantins (Gaspar, 2006). A área efetiva do sistema aquífero compreende cerca de 76.000 km², desde o oeste da Bahia até o sudeste do Tocantins.

O Sistema Aquífero Urucuia é caracterizado como um conjunto de aquíferos que ocorrem na área do Grupo Urucuia, incluindo a sub-bacia Urucuia definida por Campos & Dardenne (1997). O sistema está inserido na província hidrogeológica São Francisco, é do tipo intergranular e situa-se disposto como um tabuleiro extenso, composto basicamente por quartzo arenitos e arenitos feldspáticos eólicos bem selecionados, com presença de níveis silicificados e conglomeráticos em menor proporção (Gaspar, 2006).

O Sistema Aquífero Urucuia foi definido e detalhado por Gaspar (2006), como sendo composto por quatro subsistemas relacionados vertical e lateralmente. Tais subsistemas são representados pelo aquífero regional livre, aquífero suspenso local, aquífero regional livre profundo e aquífero confinado ou semiconfinado. Além do trabalho pioneiro de Gaspar (2006), outros estudos se sucederam visando melhor compreensão do Sistema Aquífero Urucuia, com destaque para Barbosa (2009 e 2016) e Barbosa *et al.* (2014 e 2017).

Na área de estudo ocorre o aquífero livre profundo (Figura 3.10). De acordo com Gaspar & Campos (2006), a superfície potenciométrica neste contexto apresenta um aumento progressivo de profundidade em direção ao limite da Serra Geral de Goiás.

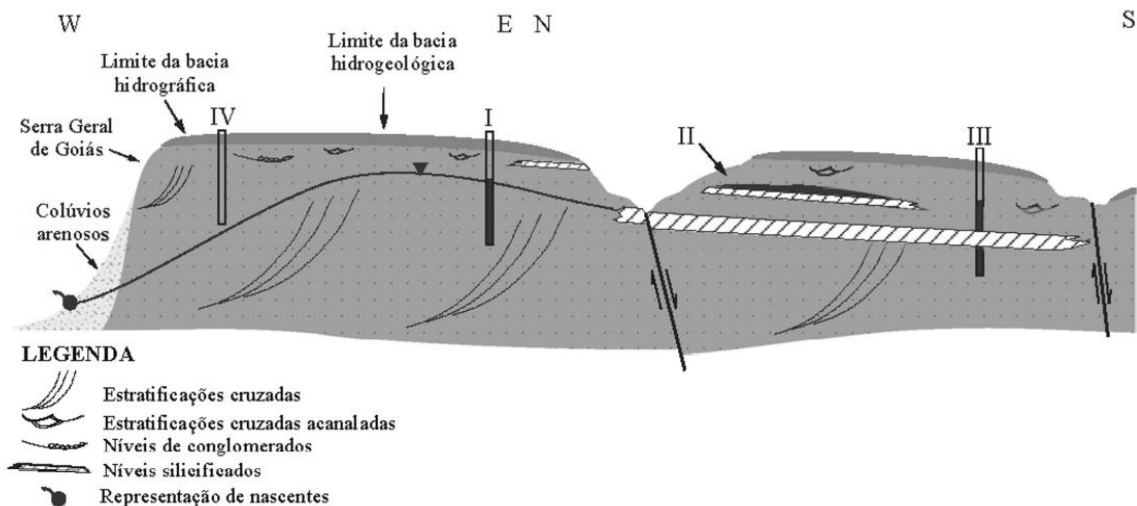


Figura 3.10 - Modelo esquemático dos subtipos de aquíferos presentes no Sistema Aquífero Urucua. Seção WE e NS integradas. O aquífero livre profundo é representado na seção leste-oeste (WE), pelo número IV. A superfície potenciométrica regional é representada pela linha contínua. Retirado de Gaspar & Campos (2006).

A condição de elevado gradiente hidráulico gera um rápido fluxo da água subterrânea em direção a oeste, e é este sistema de exutório que alimenta os rios da região cárstica do Goiás e Tocantins, bem como parte das areias coluvionares situadas entre os limites dos grupo Urucua e Bambuí.

Sistema Aquífero Bambuí

O Sistema Aquífero Bambuí é caracterizado como um sistema cárstico ou fissuro-cárstico, e pode ser dividido em subsistemas em função dos diferentes tipos de rochas existentes na ampla área de ocorrência do Grupo Bambuí. No estado de Goiás, Almeida *et al.* (2006) subdividiram o sistema aquífero em subsistemas fraturados e cársticos, em função das áreas de ocorrência de rochas carbonáticas e não carbonáticas. Campos (2012) subdividiu o Sistema Bambuí na região do Distrito Federal em Subsistema Base e Subsistema Topo, respectivamente relacionados a aquíferos fissuro-cársticos e fraturados.

Aquífero Coluvionar

O Aquífero Coluvionar foi separado para efeito do presente estudo, pois em campo observou-se que este desempenha importante papel na alimentação do sistema fissuro-cárstico representado pelo Aquífero Bambuí.

A taxa de infiltração das águas de escoamento superficial na área de ocorrências de colúvio, que é basicamente uma faixa de transição entre o Grupo Urucua a leste e o Grupo Bambuí a oeste, é relativamente elevada, e contribui para o aporte de água que chega ao sistema Bambuí. A condutividade hidráulica (K) e o coeficiente de armazenamento (S) deste aquífero

devem ser compatíveis com aqueles observados no Sistema Urucua em sua porção não confinada. Por outro lado, em função de sua menor espessura saturada a transmissividade (T) deve ser significativamente menor.

De qualquer modo este aquífero deve desempenhar importante função reguladora no sistema hidrológico local, de forma a receber águas de precipitação e transmitir para o compartimento superficial e para outros aquíferos.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados

4.1.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo foi organizado em dois itens, incluindo os Resultados e as Discussões, os quais foram divididos em subitens. Inicialmente são introduzidos os dados coletados em campo e na literatura, com apresentação de figuras, tabelas e gráficos. Em seguida, os dados são integrados e discutidos, com o objetivo de mostrar as interpretações e implicações para o modelo conceitual da área de estudo. A associação dos itens deste capítulo visa a partir dos dados sobre a caracterização dos aquíferos, ensaios de infiltração *in situ*, dados hidroquímicos, parâmetros físico-químicos, e análises isotópicas, definir o modelo conceitual do fluxo subterrâneo, caracterizar as transferências de águas entre os diferentes compartimentos, definir as bacias e sub-bacias hidrogeológicas, e a produção hídrica dos diferentes reservatórios.

No subitem de caracterização dos aquíferos são apresentadas as características intrínsecas destes, incluindo condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento, os quais demonstram basicamente o potencial de cada aquífero em armazenar e transmitir água. No subitem de Ensaios de Infiltração *in situ* são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios conduzidos em campo, e será feita uma análise no sentido do que tais resultados contribuem para o entendimento destes sistemas e para o modelo conceitual de fluxo final. No subitem dedicado a hidroquímica é apresentada a caracterização das amostras de água analisadas e feita separação de grupos quimicamente distintos, a fim de compreender quais valores caracterizam misturas e quais demonstram águas mais puras provenientes de um sistema aquífero específico.

O subitem de análises isotópicas apresenta os resultados das análises de trítio e de radiocarbono, os quais também contribuem para o modelo conceitual de fluxo final, auxiliando na compreensão de possíveis misturas entre as diferentes águas, com um indicativo de tempo de residência destas águas nos diferentes reservatórios. O tópico de modelo conceitual do fluxo subterrâneo apresenta o modelo integrado, resultando na descrição da dinâmica de transferência das águas entre os aquíferos estudados, com caracterização de duas bacias hidrogeológicas regionais a partir das informações obtidas e considerações sobre a produção hídrica dos diferentes reservatórios, sob uma ótica descritiva e qualitativa.

Considerando que parte dos resultados que serão apresentados está relacionada a amostras coletadas em pontos mapeados em diferentes etapas de campo, a Tabela 4.1 a seguir traz a identificação dos pontos, coordenadas UTM associadas, o contexto geológico correspondente, e as identificações das amostras hidroquímicas e isotópicas referentes a cada local.

Tabela 4.1 - Coordenadas dos pontos de coleta de amostras de água para análises hidroquímicas (*H) e isotópicas (*I), incluindo seu contexto geológico, coordenadas dos pontos de amostragem e codificação das amostras.

ID Ponto / Descrição	UTM	Contexto geológico	Amostra hidroquímica	Amostra isotópica
Ponto 8A (*H) - córrego com contribuição do Colúvio e margas.	371366 / 8406534	Colúvio	AMF_10	-
Ponto 8B (*H, I) - afluente do córrego, exclusivo do Bambuí.	371366 / 8406534	Bambuí - carbonatos	AMF_9	IMF 2A e B
Ponto 9 (*H) - córrego Urucuia.	371368 / 8406533	Urucuia	AMF_6	-
Ponto 10 (*H) - Rio Vermelho.	382165 / 8392435	Maior contribuição Bambuí	AMF_4	-
Ponto 12 (*H) - afluente do Rio Vermelho, córrego proveniente do Urucuia, correndo sobre carbonatos do Bambuí.	380112 / 8389317	Proveniente Urucuia - corre sobre os carbonatos do Bambuí	AMF_5	-
Ponto 14 (*H) - vereda Urucuia.	375394 / 8404928	Proveniente do Urucuia/Colúvio	AMF_7	-
Ponto 15 (*H, I) - surgência cárstica.	374011 / 8403712	Surgência cárstica	AMF_8	IMF 8A e B
Ponto 21 (*H) - afluente do Rio Corrente.	350767 / 8398134	Proveniente do Urucuia, corre no Bambuí	AMF_1	-
Ponto 23 (*H) - córrego proveniente do Urucuia.	354618 / 8396417	Urucuia	AMF_2	-
Ponto 24 (*H, I) - em propriedade de família (reservatório de água do poço).	352538/8405303	Exclusivo Bambuí	AMF_11	IMF 5A e B
Ponto 25 (*I) - córrego no Urucuia, próximo a nascente.	0385930/8397479	Urucuia	-	IMF 7B
Ponto 26 (*I) - poço próximo à vereda, no colúvio.	0375280/8404021	Colúvio	-	IMF 6B

O Mapa da Figura 4.1 mostra a distribuição espacial dos pontos de amostragem. É importante acrescentar que a amostragem foi precedida de uma análise da área como um todo, de forma que todos os compartimentos geológicos, pedológicos e geomorfológicos fossem contemplados.

Mapa Geológico - Município de Mambai GO

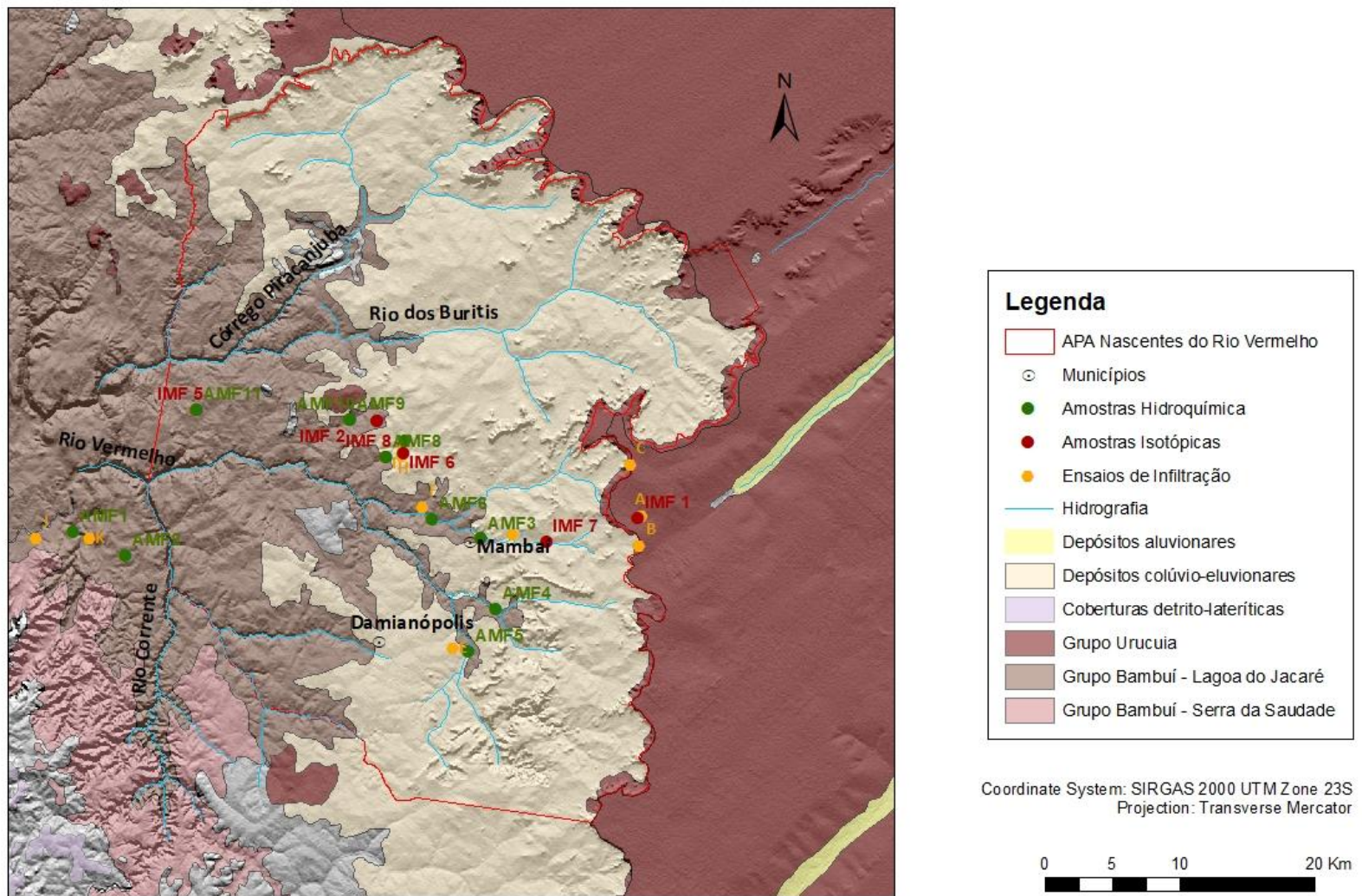


Figura 4.1 - Mapa com representação das amostras de hidroquímica, de análise isotópica, e com os pontos onde foram realizados ensaios de infiltração na área.

4.1.2 Caracterização dos Aquíferos

Sistema Aquífero Bambuí

O Sistema Aquífero Bambuí ocorre na porção central da área de estudo, onde se localiza a APA Nascentes do Rio Vermelho. Na região ocorrem os seus dois subtipos descritos na literatura, o aquífero cárstico e o aquífero fraturado. No aquífero cárstico foram observadas em campo as feições mais comuns desse tipo de formação geológica, como cavidades, sumidouros, cavernas e surgências cársticas. Nas regiões onde ocorrem as lentes de carbonato a vegetação é típica sendo denominada de “mata seca” ou floresta estacional decídua, com ampla ocorrência de paineira, aroeira, angico, entre outras espécies comuns em solos eutróficos.

Foram encontrados poucos poços cadastrados no banco de dados SIAGAS, do Serviço Geológico do Brasil, localizados na região da APA. Alguns dos boletins apresentam dados mais completos do perfil construtivo, mas a maior parte traz apenas informações relativas à profundidade, as quais variam desde 35 até 180 metros.

A porção cárstica deste sistema aquífero apresenta dois tipos de porosidades secundárias: planar e por dissolução. A porosidade secundária planar é representada por fraturas e planos de acamamento deslocados e abertos. A porosidade secundária por carstificação é típica de rochas carbonáticas, em que os espaços vazios ocorrem em função da dissolução do carbonato por ação das águas de precipitação. Em razão deste último tipo de porosidade mencionada, o tipo de fluxo predominante neste ambiente é o turbulento.

O segundo subtipo de aquífero encontrado na área de estudo é o fraturado. Este tipo ocorre nas regiões onde predominam siltitos e margas, e apresentam exclusivamente porosidade secundária do tipo planar, representada por fraturas e dilatação em planos de acamamento.

Na região da APA Nascentes do Rio Vermelho predomina o subtipo cárstico, denominado por Campos (2012) como subsistema Bambuí base. Na literatura, ele é caracterizado como um aquífero do tipo livre, raso, heterogêneo, anisotrópico e descontínuo. A condutividade hidráulica da zona não saturada varia na faixa de 10^{-5} a 10^{-6} m/s na fácies representada pelos siltitos, e na faixa de 10^{-6} a 10^{-8} m/s, na fácies carbonática do sistema. Estes últimos são os menores valores observados na área de estudo, e demonstram a baixa capacidade de infiltração nesse sistema, nos níveis mais superficiais.

Sistema Aquífero Urucuia

O sistema aquífero Urucuia é uma unidade hidroestratigráfica composta basicamente por arenitos não litificados na maior parte da seção, sendo apenas localmente silicificados em camadas pouco espessas a diferentes profundidades. Este sistema aquífero apresenta grandes

espessuras que podem alcançar até mais de 600 metros, contudo na área de estudo os dados disponíveis indicam espessuras da ordem de 250 metros, que explicam as maiores transmissividade associadas a este sistema, em comparação com o Coluvionar. Os ensaios de infiltração *in situ* conduzidos resultaram em valores de condutividade hidráulica com ordem de grandeza variando na faixa de 10^{-4} m/s na superfície. Justamente por ser um aquífero intergranular, composto por litologia relativamente homogênea, com elevada transmissividade e permeabilidade, o potencial de infiltração, de armazenamento e de transmissão deste sistema é muito elevado, e se imagina que este sistema é o principal regulador hídrico da região em estudo.

Na área de estudo é caracterizado como homogêneo, isotrópico, livre e profundo, com porosidade intergranular primária amplamente preservada. Esta porosidade confere ao aquífero um fluxo do tipo laminar, pelo caráter intergranular predominante.

Este aquífero ocorre no extremo oeste do estado da Bahia, e em superfície seu limite coincide com o limite hidrográfico, definido pela Serra Geral de Goiás, que também compõe o limite geográfico entre os estados da Bahia e Goiás.

Sistema Aquífero Coluvionar

O sistema aquífero coluvionar é um aquífero intergranular que, na área de estudo, ocorre em uma faixa de transição entre os aquíferos Bambuí e Urucuaia. É representado por areias pouco compactas, sem estruturação, em sem matriz fina. Sua espessura varia de poucos metros até mais de 40 metros. Essa unidade hidroestratigráfica é classificada como intergranular, livre, com ampla condutividade hidráulica (tanto da zona não saturada, quanto da zona saturada), homogêneo e isotrópico.

A Tabela 4.2 traz a síntese comparativa entre os aquíferos presentes na região em estudo.

Tabela 4.2. Comparação dos valores de referência de parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais dos diferentes modelos conceituais de aquíferos. η = porosidade, η_e = porosidade efetiva, K = condutividade hidráulica da zona saturada, T = transmissividade, S = coeficiente de armazenamento e C_{esp} = capacidade específica.

AQUÍFERO	PARÂMETROS HIDRÁULICOS E DIMENSIONAIS					
	η (%)	η_e (%)	K (m/s)	T (m^2/s)	S	Tipo de Porosidade
Urucuaia	18 a 22	15 a 20	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	10^{-1}	Intergranular
Coluvionar	22 a 25	20 a 22	10^{-5}	10^{-6}	10^{-1}	Intergranular
Bambuí - Cárstico	15 a 30	2 a 25	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	10^{-1}	Secundária por dissolução
Bambuí - Fraturado	2 a 5	1 a 2	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-6}$	$10^{-1} - 10^{-2}$	Secundária planar

4.1.3 Ensaios de Infiltração *in situ*

Os ensaios de infiltração foram realizados nos locais de ocorrência dos principais tipos de solo encontrados na área analisada, sendo eles: latossolos vermelhos, neossolos quartzarênicos, nitossolos vermelhos e argissolos vermelhos, conforme Tabela 4.3. Importante destacar que estes resultados representam a condutividade hidráulica da porção rasa da zona não saturada dos diferentes aquíferos estudados e apresentam implicações importantes sobre o comportamento da infiltração e recarga nos aquíferos.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de infiltração, gerando dados de condutividade hidráulica vertical, da zona não saturada, em superfície e subsuperfície, pelos ensaios de Anéis Concêntricos e *Open end Hole*.

	Tipo de solo	Coordenadas UTM Elevação	Kv (m/s) - Anéis Concêntricos	Kv (m/s) - <i>Open end Hole</i> (profundidades distintas)
Ponto A	Latossolo Vermelho	0393022/8399385 885 m	$5,48 \times 10^{-4}$	50 cm - $4,25 \times 10^{-6}$ 100 cm - $1,82 \times 10^{-6}$ 150 cm - $1,11 \times 10^{-6}$ 200 cm - $1,07 \times 10^{-6}$
Ponto B	Latossolo Vermelho	0392849/8397122 880 m	$1,42 \times 10^{-4}$	50 cm - $1,39 \times 10^{-6}$ 100 cm - $1,53 \times 10^{-6}$ 150 cm - $6,56 \times 10^{-7}$ 200 cm - $6,46 \times 10^{-7}$
Ponto C	Latossolo Vermelho-amarelo	0392167/8403216 925 m	$3,01 \times 10^{-4}$	100 cm - $1,30 \times 10^{-6}$ 150 cm - $9,89 \times 10^{-7}$ 200 cm - $7,98 \times 10^{-8}$
Ponto D	Neossolo Quartzarênico	0383496/8398028 773 m	$5,26 \times 10^{-4}$	50 cm - $1,34 \times 10^{-5}$ 100 cm - $4,70 \times 10^{-6}$ 150 cm - $2,81 \times 10^{-6}$ 200 cm - $2,58 \times 10^{-6}$
Ponto E	Neossolo Quartzarênico	0379002/8389527 702 m	$2,51 \times 10^{-5}$	50 cm - $2,33 \times 10^{-6}$ 100 cm - $7,74 \times 10^{-7}$ 150 cm - $6,01 \times 10^{-7}$ 200 cm - $6,86 \times 10^{-7}$
Ponto F	Nitossolo Vermelho eutrófico	0376721/8400022 701 m	$3,53 \times 10^{-5}$	40 cm - $1,23 \times 10^{-7}$ 50 cm - $2,77 \times 10^{-6}$
Ponto G	Nitossolo Vermelho eutrófico	0371366/8406534 695 m	$2,69 \times 10^{-6}$	40 cm - $9,17 \times 10^{-7}$ 60 cm - $4,34 \times 10^{-7}$
Ponto H	Nitossolo Vermelho eutrófico	0375313/8404275 742 m	$5,03 \times 10^{-6}$	30 cm - $1,29 \times 10^{-7}$ 50 cm - $1,94 \times 10^{-7}$
Ponto I	Latossolo Vermelho-Amarelo	0375213/8403837 763 m	$7,81 \times 10^{-5}$	50 cm - $5,04 \times 10^{-6}$ 100 cm - $2,84 \times 10^{-6}$ 150 cm - $1,23 \times 10^{-6}$ 200 cm - $9,14 \times 10^{-7}$
Ponto J	Argissolo Vermelho eutrófico	0347963/8397692 538 m	$5,28 \times 10^{-7}$	40 cm - $1,96 \times 10^{-6}$ 50 cm - $4,73 \times 10^{-7}$
Ponto K	Argissolo Vermelho eutrófico	0351931/8397715 614 m	$6,18 \times 10^{-6}$	40 cm - $1,24 \times 10^{-7}$ 50 cm - $4,56 \times 10^{-8}$

Os latossolos vermelho e vermelho-amarelo estão associados aos arenitos pertencentes ao Grupo Urucuia, e são caracterizados por valores mais elevados de condutividade hidráulica, quando comparados aos demais solos. Os valores na faixa de 10^{-4} m/s na superfície, obtidos através dos ensaios de anéis concêntricos demonstram elevada infiltração no meio subterrâneo.

Os neossolos quartzarênicos ocorrem nos locais onde predomina o Colúvio, o qual configura uma zona de transição entre os arenitos e os siltitos/carbonatos do Grupo Urucuia e Bambuí, respectivamente, e que é composta por areias inconsolidadas. Os valores de condutividade hidráulica para estes solos são ligeiramente inferiores aos do latossolo vermelho, variando entre 10^{-4} e 10^{-5} m/s na superfície.

Os nitossolos vermelhos apresentam associação com a fácies de siltito do Grupo Bambuí, com valores de condutividade hidráulica na superfície variando entre 10^{-5} e 10^{-6} m/s. Já a fácies carbonática do Grupo Bambuí na área é representada pelos argissolos vermelhos, que apresentam os valores mais baixos de condutividade observados, com uma faixa de 10^{-6} a 10^{-7} m/s na superfície.

4.1.4 Hidroquímica e Parâmetros Físico-Químicos

A coleta para as análises de espectrometria e cromatografia foi realizada no período da seca da região centro-oeste. Foram coletadas ao todo onze amostras, intituladas AMF-1 a AMF-11, as quais estão listadas na Tabela 4.4 a seguir, com os respectivos dados de coordenadas UTM, cota do local de coleta, e parâmetros físico-químicos medidos *in situ*, sendo eles temperatura, condutividade elétrica, pH e Eh, e foi feita também correlação entre a identificação da amostra e o ponto onde a mesma foi coletada.

Tabela 4.4 - Parâmetros físico-químicos das águas coletadas na primeira campanha de monitoramento.

Amostra	Ponto	Geologia	UTM	UTM	Cota (m)	CE (μ S/cm)	pH	Eh (mV)
AMF-1	21	Urucuia	350767	8398134	523	447	7,99	-59,1
AMF-2	23	Urucuia	354618	8396417	688	161,8	7,32	-20,0
AMF-3	3	Colúvio	381094	8397690	705	12,28	7,11	-7,2
AMF-4	10	Bambuí	382165	8392435	678	32,6	7,66	-38,8
AMF-5	12	Urucuia	380112	8389317	687	19,18	7,66	-38,8
AMF-6	9	Urucuia	377463	8399113	645	13,24	7,53	-31,5
AMF-7	14	Urucuia	375394	8404928	726	8,4	5,75	72,7
AMF-8	15	Bambuí	374011	8403712	708	217,6	8	-58,5
AMF-9	8B	Bambuí	371366	8406534	635	391	8,13	-66,3
AMF-10	8A	Colúvio	371366	8406534	635	117,9	7,95	-55,6
AMF-11	24	Bambuí	352538	8405303	713	725	7,52	-32,8

A princípio é possível destacar a amostra AMF-11 como sendo a de maior condutividade elétrica entre as coletadas, com 725 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e este foi também o valor mais alto observado na área de estudo. Esta amostra foi coletada em região onde afloravam lentes de calcáreo, já distante do local de domínio dos arenitos do Grupo Urucuia ou areias do Colúvio, no reservatório da água oriunda de um poço de abastecimento doméstico. Tal condutividade observada com valor elevado pode ser resultado de um tempo maior de residência dessa água no sistema carbonático, o que pode ter gerado em alguma medida certa interação água-rocha, por mais que não seja um processo comum na área de estudo, como será discutido posteriormente. A segunda amostra com alto valor de condutividade elétrica analisada é a AMF-1, com 447 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e pH de 7,99. Esta amostra foi coletada em um afluente do Rio Corrente, que nasce na região do oeste da Bahia, mas em função do divisor hidrográfico da região corre para oeste, e passa a interagir com águas do sistema Bambuí, o que lhe confere características de águas com contribuição do sistema cárstico. A amostra coletada com menor condutividade é a AMF-7, com valor de 8,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e o pH mais ácido observado dentre as amostras. Esta água foi coletada em um local de vereda localizada em areias coluvionares. A segunda amostra com condutividade mais baixa é a AMF-3, coletada em um córrego já próximo a cidade de Mambaí. Este córrego drena integralmente as areias inconsolidadas, e nasce dentro da área do Colúvio e, portanto, considera-se como sendo um exemplo de água exclusiva desta unidade hidroestratigráfica. Outra amostra com baixa condutividade é a AMF-6, com CE de 13,24 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH de 7,53. Esta amostra foi coletada em córrego que nasce na área do Urucuia, mas no local de coleta este curso d'água está em contato com os calcários da Formação Lagoa do Jacaré. Pelos parâmetros descritos é possível sugerir que este é um córrego que ainda não sofreu mistura com águas do carste, mesmo estando inserido em seu domínio.

Pode-se afirmar que a maior parte das águas amostradas não é exclusiva do Sistema Bambuí, uma vez que em sua maioria são coletadas em cursos superficiais que de alguma forma tem contribuições de drenagens que fluem a partir da Serra Geral de Goiás, tendo então interação com os arenitos do Grupo Urucuia. A única amostra que pode ser considerada exclusiva do sistema cárstico é a AMF-8, que apresenta condutividade elétrica de 217,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH alcalino igual a 8. Esta amostra é de um local típico de sistemas carbonáticos, representado por uma surgência cárstica em meio aos calcários da Formação Lagoa do Jacaré. Neste local foi possível observar o ponto exato da surgência com exudação de gases junto com a água. Esta é a nascente mais representativa do sistema cárstico na região.

Os resultados analíticos das águas coletadas e analisadas em laboratório para elementos maiores e menores estão representados nos diagramas de Piper da Figura 4.2. Na Figura 4.2A estão representados os resultados das águas em que foram realizadas apenas as análises

hidroquímicas de elementos maiores e menores. O diagrama da Figura 4.2B representa as águas em que também foram realizadas análises dos isótopos de radiocarbono e/ou trítio. As amostras AMF-9 e IMF-2 correspondem ao mesmo ponto de coleta, bem como a AMF-8 e IMF-8, e a AMF-11 e IMF-5.

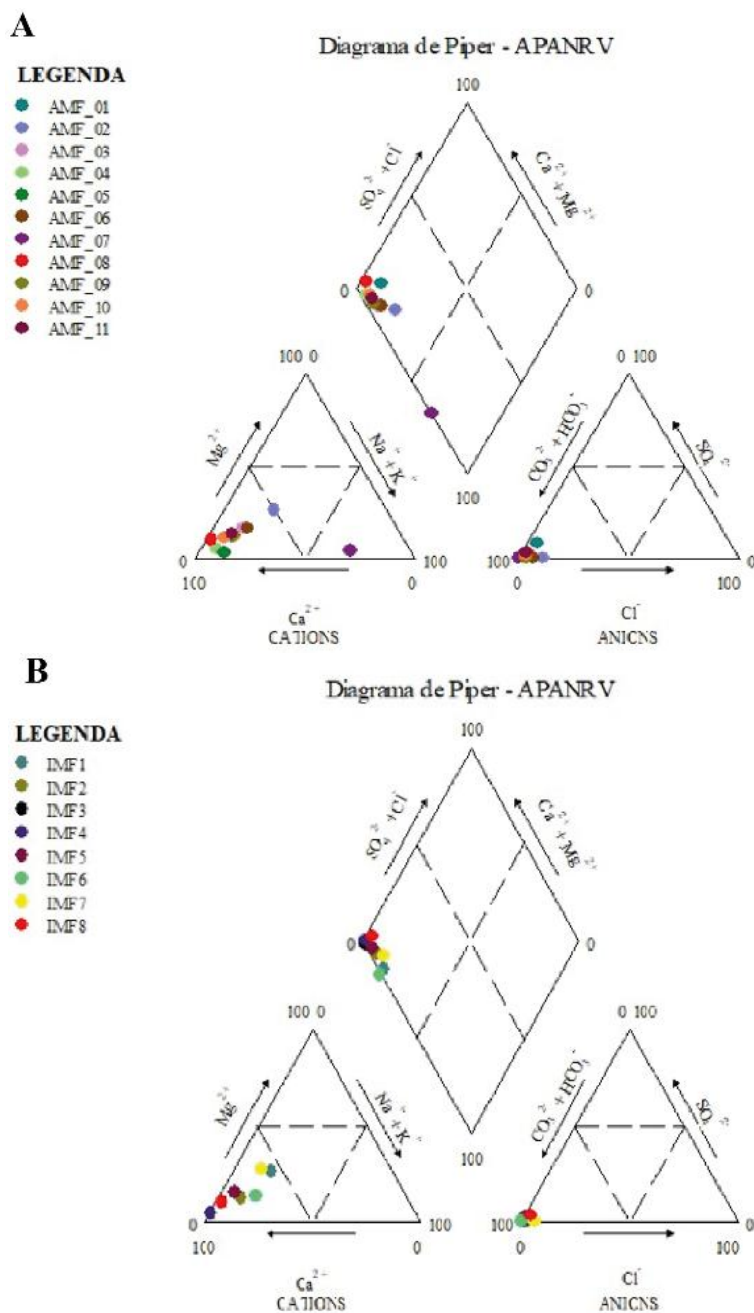


Figura 4.2 - Diagramas de classificação do tipo químico predominante nas amostras de águas da região estudada. A - Primeira campanha de monitoramento (período seco 2020); B - Terceira campanha de monitoramento (período seco 2021).

No decorrer do presente trabalho foi realizado monitoramento dos parâmetros físico-químicos em pontos considerados essenciais para a diferenciação e compreensão da interação entre os três sistemas aquíferos da região. A primeira campanha de medição foi realizada no período de seca, em outubro de 2020, com monitoramento de nove pontos (os quais seguiram

sendo monitorados nas duas campanhas seguintes). A segunda campanha ocorreu no período chuvoso, em janeiro de 2021, e a terceira novamente no período da seca, em setembro de 2021.

A localização dos pontos e descrição foi apresentada na Tabela 4.1. Os parâmetros físico-químicos obtidos nos três monitoramentos são apresentados na Tabela 4.5 a seguir, incluindo dados de condutividade elétrica (CE - $\mu\text{S}/\text{cm}$), potencial hidrogeniônico (pH - adimensional), Eh (potencial de oxi-redução - mV).

O monitoramento foi realizado com intuito de distinguir águas que se originam nos arenitos do Sistema Aquífero Urucuia de águas provenientes do Aquífero Coluvionar, mas principalmente de águas que são produzidas pelo Aquífero Urucuia e percorrem extensos percursos no terreno cárstico do Aquífero Bambuí, sofrendo misturas e passando por interações com o sistema, como é o caso, por exemplo, das amostras coletadas no rio vermelho (Ponto 10). Na medição realizada neste local na época da seca no ano de 2020, é possível notar um valor baixo de condutividade elétrica, $32,60 \mu\text{S}/\text{cm}$ e um pH de 7,66, valores mais associados ao contexto dos arenitos do Grupo Urucuia, onde o sistema como um todo é mais inerte, com águas pouco mineralizadas e neutras a levemente ácidas. Estas medições demonstram que o Rio Vermelho preserva as características do seu local de origem, mesmo percorrendo maiores distâncias sobre rochas carbonáticas.

Na área foram identificados dois extremos bem característicos para as águas monitoradas, e um terceiro intervalo de valores intermediários aos dois primeiros. De maneira geral observou-se que as águas oriundas do Aquífero Bambuí são as mais mineralizadas da região, com condutividades elétricas variando entre 200 e $447 \mu\text{S}/\text{cm}$, e valores de pH entre 7,99 e 8,13. O outro extremo são as águas provenientes do Aquífero Urucuia, que como já foi comentado, é um sistema mais inerte, com condutividades elétricas variando entre 8 e $33 \mu\text{S}/\text{cm}$, e valores de pH entre 5,75 e 7,66. As águas intermediárias são as medidas na região das areias do sistema Coluvionar, com valores de condutividade elétrica no intervalo de 100 a $120 \mu\text{S}/\text{cm}$, e pH na faixa de 7,90.

Os sistemas Urucuia e Coluvionar são relativamente similares, uma vez que os depósitos colúvio-eluvionares são derivados da erosão recuante e retrabalhamento dos próprios arenitos. Mas é perceptível como as condutividades elétricas do Urucuia são muito mais baixas quando comparadas às do sistema coluvionar, e são também águas ligeiramente mais ácidas.

Outro aspecto importante que deve ser observado nos dados de monitoramento é que no decorrer das três campanhas as águas foram seguindo uma tendência de diluição desde Outubro de 2020, até Janeiro de 2021 e por fim em Setembro de 2021. Este fenômeno provavelmente está associado a variações no período chuvoso que houve entre 2019 e 2020, resultando na diluição das águas da região no período seguinte.

Tabela 4.5 - Pontos onde foi realizado monitoramento dos parâmetros físico-químicos das respectivas águas, com dados das coordenadas UTM e os valores medidos de temperatura (T), condutividade elétrica (CE), pH e Eh, nas datas associadas.

Data Medição		Outubro de 2020 (seca)				Janeiro de 2021 (chuvoso)				Setembro de 2021 (seca)			
Parâmetros		T (°C)	CE (µS/cm)	pH	Eh (mV)	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	Eh (mV)	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	Eh (mV)
Pontos	UTM												
8A - Córrego com contribuição de colúvio e margas	371366 8406534	23,80	117,90	7,95	-55,60	24,5	108,60	8,78	104,00	17,80	78,40	7,55	31,90
8B - Afluente do córrego, exclusivo Bambuí	371366 8406534	25,20	391,00	8,13	-66,30	24,40	424,00	8,68	-98,30	18,90	305,00	7,71	-41,20
9 - Córrego no Urucuia	371368 8406533	24,20	13,24	7,53	-31,50	25,20	17,83	8,68	-109,80	24,10	9,12	7,35	-21,40
10 - Rio Vermelho	382165 8392435	24,20	32,60	7,66	-38,80	24,40	36,90	8,56	-91,00	25,70	26,10	7,76	-45,20
12 - Córrego vindo do Urucuia, correndo no carste do Bambuí	380112 8389317	24,10	19,18	7,66	-38,80	23,70	19,06	8,70	-99,00	23,90	11,57	7,25	-15,00
14 - Vereda no Urucuia	375394 8404928	28,50	8,40	5,75	72,70	30,10	8,96	5,47	89,30	27,80	6,58	5,38	93,60
15 - Surgência cárstica	374011 8403712	24,70	217,60	8,00	-58,50	23,80	207,50	8,66	-96,70	23,30	158,40	7,84	-49,40
21 - Afluente do rio Corrente	350767 8398134	29,10	447,00	7,99	-59,10	25,50	326,00	9,28	-133,00	21,90	290,00	8,14	-66,30
23 - Córrego proveniente do Urucuia	354618 8396417	32,50	161,80	7,32	-20,00	35,50	164,90	7,64	-39,00	26,40	263,00	7,22	-14,00

4.1.5 Análises Isotópicas

Na Tabela 4.6 está apresentada a localização e as principais feições de campo das oito amostras analisadas para radiocarbono e/ou trítio, com as respectivas coordenadas UTM, contexto geológico associado, matriz amostrada e parâmetros medidos *in situ*, respectivos valores de pH, condutividade elétrica e Eh.

Tabela 4.6 - Localização das amostras para análises isotópicas e principais características dos pontos de coleta.

Data da Coleta	Identificação da Amostra	Coordenadas	Geologia Associada	Matriz Amostrada	Parâmetros
09/09/21 (~16h)	IMF 1A e B	23L 0392753/8399189 883m elevação	Grupo Urucuia	Poço - água subterrânea	pH: 6,01
					CE: 7,10µS/cm
					Eh: +57,1mV
10/09/21 (~8:30)	IMF 2A e B	23 L0371366/8406534 695 m elevação	Grupo Bambuí: margas, calcários e siltitos.	Aflente de córrego - água superficial	pH: 7,71
					CE: 305µS/cm
					Eh: -41,2mV
10/09/21 (~10:00)	IMF 3A e B	23L 0373344/8406392	Grupo Bambuí: caverna no calcário.	Água coletada dentro da caverna Tarimba - água subterrânea	pH: 8,3
					CE: 153,3µS/cm
					Eh: -75,1mV
10/09/2021 (~10:10)	IMF 4A e B	23L 0373344/8406392	Grupo Bambuí: caverna no calcário.	Água coletada dentro da caverna - água subterrânea	pH: 8,08
					CE: 74,8 µS/cm
					Eh: -63,2mV
10/09/21 (~11:40)	IMF 5A e B	23L 0352538/8405303	Grupo Bambuí: extremamente carbonatada.	Água coletada de torneira vinda diretamente do poço - água subterrânea	pH: 7,27
					CE: 421 µS/cm
					Eh: -17,5mV
10/09/2021 (~14:00)	IMF 6B	23L 0375280/8404021 762 m elevação	Colúvio.	Água coletada diretamente na torneira do poço - água subterrânea	pH: 5,78
					CE: 13,8 µS/cm
					Eh: 70,7 mV
10/09/21 (~17:00)	IMF 7B	23L 0385930/8397479 776 m elevação	Grupo Urucuia. Nos arenitos.	Água coletada em córrego localizado no Urucuia - água superficial	pH: 6,78
					CE: 8,66 µS/cm
					Eh: +12,2mV
11/09/21 (~07:40)	IMF 8A e B	23L 0374011/8403712 708 m elevação	Grupo Bambuí. Carbonatos micríticos.	Água coletada em surgência cárstica. Pode ser considerada nascente - água superficial	pH: 7,76
					CE: 162,3 µS/cm
					Eh: -44,4mV

A Tabela 4.7 mostra os resultados das análises isotópicas, com os valores de bicarbonato e os cátions Ca, Sr, Na e K analisados em laboratório, e os valores para radiocarbono, *Apparent RC Age*, e trítio, Unidade de Trítio.

Tabela 4.7 - Tabela com as amostras analisadas para Trítio e Radiocarbono, e suas respectivas informações. T: temperatura; CE: condutividade elétrica; HCO₃: bicarbonato; Ca: cálcio, Sr: estrôncio, Na: sódio, K: potássio.

Amostra	HCO ₃ (mg/L)	Apparent RC Age	Unidade de Trítio (UT)	Ca (mg/L)	Sr (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
IMF 1	4,78	1890	0,48±0,13	0,67	<ld	0,18	0,09
IMF 2	162,46	20	1,14±0,19	76,9	0,31	8,06	6,16
IMF 3	77,2	1550	0,82±0,18	39,5	0,13	0,52	0,3
IMF 4	34,43	3390	0,90 ± 0,16	19,1	0,06	0,24	0,13
IMF 5	215,07	280	0,86 ± 0,16	118	2,09	10,93	1,03
IMF 6	1,5	-	0,67 ± 0,14	0,52	<ld	0,14	0,01
IMF 7	3,55	-	0,28 ± 0,14	0,89	<ld	0,16	0,1
IMF 8	79,25	1020	0,91 ± 0,14	45,4	0,18	1,54	0,6

4.1.5.1 Trítio

Os resultados isotópicos para trítio são analisados em unidade de trítio, e sua avaliação deve ser feita de forma comparativa entre as diferentes amostras. No hemisfério sul os valores são mais baixos do que os registrados no hemisfério norte, devido aos testes nucleares realizados desde a década de 1950.

Nesta pesquisa os resultados de trítio foram utilizados em conjunto com os de radiocarbono, uma vez que o primeiro método é aplicado para datação de águas relativamente jovens, e o segundo se aplica a águas mais antigas que 250 anos. Os menores valores de trítio identificam águas mais velhas ou com pequena contribuição de águas de precipitação mais recente, enquanto os valores mais altos se referem a águas jovens e/ou com maior contribuição de recarga recente. Tendo como base essa premissa, os resultados obtidos – em unidades de trítio – foram analisados e separados em quatro grupos distintos, os quais seguem.

O primeiro grupo se refere às amostras 1 e 7, com valores 0,48UT e 0,28UT, respectivamente. São os menores valores observados dentre as análises, e ambos representam águas provenientes do Grupo Urucua, e caracterizam, portanto, águas com menor contribuição de recarga recente ou águas mais antigas desde sua entrada no aquífero. Tais resultados contribuem para o modelo conceitual da área, uma vez que indicam que as águas do Aquífero Urucua se infiltram e abastecem o sistema, alimentando fluxos regionais mais profundos.

O segundo grupo se refere à amostra 2, com valor de 1,14 UT, sendo este o maior valor observado. Esta amostra foi coletada em um tributário próximo a nascente de um córrego principal, nos calcários do Grupo Bambuí. O valor mais elevado indica uma água com contribuição de recarga recente advinda das precipitações que ocorrem na região.

O terceiro grupo é composto pelas amostras IMF-3, 4, 5 e 8, com valores intermediários de trítio. As duas primeiras foram coletadas no interior da caverna denominada Tarimba, sendo a amostra IMF-3 de um afluente principal, e a IMF-4 de um afluente secundário. Ambas possuem pH alcalino similar, porém o que chama a atenção são as condutividades elétricas medidas em campo. A amostra IMF-3 apresentou valor de 153,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e a amostra IMF-4 valor de 74,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O valor mais elevado de CE indica uma água com maior concentração de sais dissolvidos, o que se associa às águas advindas do sistema carbonático ou que tiveram maior tempo de permanência com essas rochas. O resultado para trítio da primeira foi de 0,82 UT e da segunda 0,90 UT, valores relativamente próximos e moderados, o que indica águas com maior tempo de permanência no sistema ou então com pequena contribuição de recargas recentes. Porém, a condutividade elétrica da amostra IMF-4 condiz com um sistema de caráter mais inerte, mais propriamente correlacionável aos arenitos do Grupo Urucuia, e não com um sistema mais rico em carbonatos e siltitos da Formação Lagoa do Jacaré.

Estas constatações sugerem que as águas do canal secundário provavelmente advêm de uma mistura entre o fluxo regional oriundo do Sistema Aquífero do Urucuia e um fluxo mais local de águas jovens e modernas que se infiltraram nos carbonatos do Bambuí.

A amostra IMF-5 apresenta valor de 0,86 UT e foi coletada em calcários da Formação Lagoa do Jacaré do Bambuí, enquanto a IMF-8 apresenta valor de 0,91 UT, e foi coletada em surgência tipicamente cárstica. Ambas são interpretadas como águas relativamente jovens e associadas ao sistema carbonático predominante da área de estudo.

O quarto grupo é composto pela amostra IMF 6, também caracterizada como intermediária. Ela foi coletada em poço localizado na região do colúvio, e resultou em valor de 0,67 UT, mais baixo que o observado no grupo 3. Portanto, é uma água com menor contribuição de recargas recentes, ou que apresenta maior tempo de permanência no sistema coluvionar. Estas interpretações atribuem às águas do sistema coluvionar um caráter de fluxos regionais a intermediários, onde há maior tempo de residência destas águas no sistema, e de forma que tais fluxos possam ter se originado no Sistema Aquífero Urucuia.

4.1.5.2 Radiocarbono

Os resultados das análises de radiocarbono são reportados como porcentagem de carbono moderno (pMC), e fração de carbono moderno (F14C), os quais são obtidos a partir do carbono

inorgânico dissolvido (DIC). A idade aparente de radiocarbono é utilizada apenas como referência, pois representa o tempo de residência da água no reservatório na ausência de quaisquer efeitos hidro-geoquímicos. Os isótopos de carbono reportados ($\delta^{13}\text{C}$, em partes por mil) são relativos ao padrão internacional VPDB, e os isótopos de deutério e oxigênio (δD e $\delta^{18}\text{O}$, também em partes por mil) são reportados com relação ao padrão VSMOW.

As idades fornecidas pelo laboratório como idades aparentes (*Apparent RC Age*) são idades calculadas com base na equação:

$$t = - 8035 \ln (\delta\text{C14}_{\text{final}} / \delta\text{C14}_{\text{initial}})$$

Onde:

t = a idade de radiocarbono da amostra.

8035 = a constante de decaimento do radiocarbono, ou seja, a meia-vida dividida por $\ln 2$. Foi considerada uma meia-vida de 5568 anos para o carbono 14, convenção internacional (meia-vida de Libby).

\ln = logaritmo natural.

$\delta\text{C14 final}$ = o conteúdo medido de radiocarbono da amostra.

$\delta\text{C14 inicial}$ = o conteúdo de radiocarbono do padrão moderno.

Este valor fornece uma medição simples da idade da água subterrânea, antes de se aplicar a correção associada a diluição do carbono. Após a correção os valores de idade podem permanecer iguais à idade aparente ou serem mais jovens, e por isso estas idades de *Apparent RC Age* são consideradas como idade máxima. O que ocorre nos sistemas é que durante o tempo de residência das águas nos aquíferos existem outras fontes que podem adicionar carbono através de reações químicas, principalmente por dissolução de carbonatos, processo que se imagina muito abundante no aquífero Bambuí sob estudo. Os carbonatos do meio subterrâneo, por terem sido formados há muitos milhares de anos, dificilmente apresentam algum conteúdo restante de C14 em sua matriz, e por essa razão tendem a diluir o teor que será analisado de C14 da água. Por esse motivo a datação absoluta fornece a idade máxima (Silva Jr. *et al*, 2021).

A partir dos valores reportados nos laudos do laboratório, foi proposto um gráfico de $\sigma^{18}\text{O}$ versus σD (Gráfico na Figura 4.3), com a representação da Reta Meteórica Global (*Global Meteoric Water Line – GMWL*) (Craig, 1961), calculada a partir da equação $y = 8x+10$, onde x é o valor de $\sigma^{18}\text{O}$ de cada amostra plotada, e y é o valor calculado de σD .

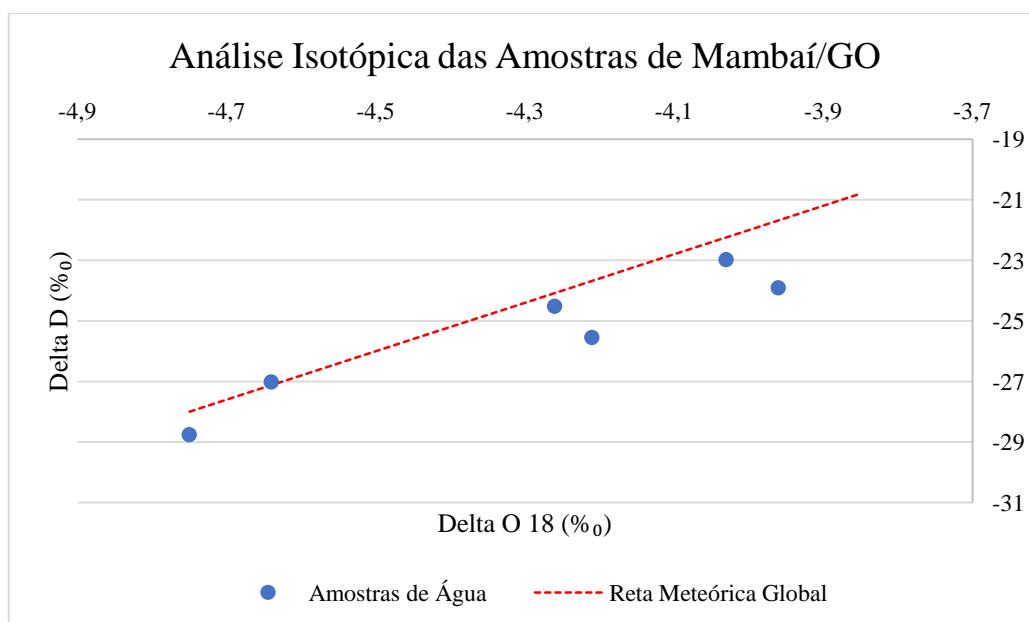


Figura 4.3 - Análise isotópica das amostras da região de Mambaí/GO e arredores. Eixo X: $\delta^{18}\text{O}$ (‰). Eixo Y: delta D (‰). Linha tracejada em vermelho: reta meteórica global.

4.2 Discussão

Os resultados obtidos a partir dos testes de infiltração permitem afirmar que os aquíferos Urucuia e Coluvionar são as unidades responsáveis pelas melhores condições de infiltração e recarga, enquanto na área do Aquífero Bambuí as taxas de infiltração são de duas a três casas decimais inferiores, predominando nestes solos o escoamento superficial em detrimento da infiltração e recarga do sistema.

Os dados de condutividade hidráulica na porção rasa da zona não saturada confirmam que os responsáveis pela manutenção da produção hídrica no Sistema Aquífero Bambuí da região são os arenitos do Grupo Urucuia e as areias coluvionares. Então estas unidades hidroestratigráficas são as mantenedoras do caráter perene dos cursos superficiais na região da APA Nascentes do Rio Vermelho, onde ocorrem as rochas do Grupo Bambuí.

Do ponto de vista estrito da função reservatório o Sistema Urucuia é a unidade com maior expressão, pois apresenta a maior espessura saturada dentre os três conjuntos. Entretanto o sistema Coluvionar, mesmo tendo menor potencial como reservatório mostra excelentes condições de infiltração e recarga e, portanto, seu funcionamento como regulador das vazões dos cursos superficiais com escoamento de base é similar ao do Sistema Aquífero Urucuia.

A avaliação geral dos dados de hidroquímica, tanto pela classificação das águas, quanto pelo monitoramento de parâmetros físico-químicos mostra que dois grupos de águas podem ser definidos do ponto de vista químico: i) águas produzidas em arenitos maduros e que apenas tiveram contato com este tipo de reservatório (exemplos: águas de poços tubulares nos sistemas aquíferos Urucuia e Coluvionar ou águas de veredas que nascem e se mantêm exclusivamente

em areias da Formação Chapadão); ii) águas de descarga do Sistema Aquífero Urucuia que entram em contato com rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré.

No primeiro caso as águas são ácidas com baixa mineralização e no segundo grupo o pH é mais elevado e a mineralização total da água é significativamente maior. As variações da condutividade elétrica das águas do segundo grupo são devidas ao maior/menor tempo de contato e interação entre a água de fluxo superficial ou subterrâneo com rochas carbonáticas.

Os diagramas de Piper com plotagem de amostras de períodos secos (Figura 4.2) possibilitam verificar que a maior parte das amostras é rica no cátion cálcio e em bicarbonato como ânion, e são, portanto, águas classificadas como bicarbonatadas cálcicas. A amostra AMF-7 apresenta composição distinta em termos catiônicos, com maior quantidade de sódio, e seria então uma água bicarbonatada sódico-cálcica. Esta é a amostra mencionada anteriormente como sendo aquela com a menor condutividade elétrica observada na área, coletada em uma vereda onde ocorrem exclusivamente areias coluvionares de retrabalhamento do Grupo Urucuia.

Pode-se observar no gráfico da Figura 4.3 que os resultados das amostras identificadas como IMF plotaram abaixo da Reta Meteorica Global, indicando que as águas sofreram evaporação previamente a sua entrada no aquífero na forma de recarga, pois são águas mais enriquecidas nos isótopos pesados quando comparadas às águas de precipitação global.

Este comportamento do resultado das águas em comparação com a reta da água meteórica global também é uma evidência que corrobora com a hipótese de que não há uma forte interação água-rocha no sistema estudado. Esta interação seria na forma de hidratação de argilas, ou de feldspatos com a água de circulação dos aquíferos, o que resultaria na tendência de que os pontos plotassem acima da reta da água meteórica local ou global (Souza, 2017).

Mesmo considerando a existência do aquífero cárstico, o íon bicarbonato passa por processo de dissolução, mas não há fracionamento a partir da disponibilização preferencial de hidroxilas da estrutura dos minerais.

De forma geral os resultados de radiocarbono e trítio são concordantes. A amostra IMF-1 foi coletada diretamente do Sistema Aquífero Urucuia a partir de poço tubular profundo, e é uma das amostras mais antigas e com menor contribuição de recarga recente dentre as analisadas. Seu resultado de trítio é baixo, menor do que 0,5 UT, de forma que se trata de água com baixa contribuição de águas meteóricas recentes, e que provavelmente integra o fluxo regional na região, o que corrobora a interpretação de não haver contribuição de infiltração recente. É importante salientar que a porção estudada do Sistema Aquífero Urucuia foi classificada por Gaspar (2006) e Gaspar & Campos (2006) como o subtipo regional profundo. Outro dado que chama atenção neste poço é o valor elevado de condutividade elétrica, o qual é atribuído ao fluido de perfuração uma vez que se trata de amostragem realizada em um poço recém-construído.

As amostras coletadas no interior da Gruta Tarimba também apresentaram resultados interessantes para trítio e radiocarbono. São águas com valores similares de UT, mas com idades de radiocarbono bastante distintas, a amostra IMF-3 possui idade aparente da ordem de 1.550 anos AP, enquanto a amostra IMF-4 indica idade aparente de 3.390 anos AP. Esta última amostra, com idade mais antiga mostra menor pH quando comparada a amostra IMF-3. Estas informações indicam que a amostra IMF-3 pode ter maior contribuição de água produzida pelo próprio carste, enquanto a amostra IMF-4 apresentou idades de radiocarbono mais antigas, o que pode indicar maior contribuição de água proveniente de fluxo regional do Sistema Urucuia. As condutividades elétricas corroboram com esta hipótese sobre a origem de cada uma das águas, a amostra IMF-4 mostra valor mais baixo (de 74 $\mu\text{S}/\text{cm}$), que é mais coerente com as águas do Sistema Aquífero Urucuia; principalmente em comparação com a IMF-3, que se assemelha mais aos valores de condutividade elétrica atribuídos ao Sistema Aquífero Bambuí. Embora sejam águas coletadas em pontos próximos no interior de uma cavidade cárstica, são águas de origens distintas, com tempos distintos de permanência no sistema e com diferentes tempos de residência em seus reservatórios (a amostra IMF-4, embora mais antiga, teve menor contato com rochas carbonáticas).

A água com maior valor de UT dentre as analisadas é a IMF-2, que possui 1,14 UT e 20 anos AP de idade aparente de carbono. E não coincidentemente, os valores indicam que esta é a água da região com maior resultado de trítio, ou seja, com maior contribuição das águas meteóricas recentes, e ao mesmo tempo possui idade aparente de radiocarbono extremamente baixa. Estas são águas coletadas no sistema Bambuí, em locais de ocorrência de margas, calcários e siltitos, e imagina-se que sejam de fato águas com maior contribuição de recarga recente, pelo próprio caráter do reservatório.

4.2.1 Modelo Conceitual do Fluxo Subterrâneo

A partir dos dados disponíveis foi elaborado o modelo hidrogeológico conceitual representado na Figura 4.4. No modelo estão representados os três sistemas estudados na área: Urucuia, Bambuí e Coluvionar. O primeiro representado em amarelo, com indicação das estratificações cruzadas de grande porte, é a unidade hidroestratigráfica com maior espessura. O Sistema Aquífero Bambuí foi representado por suas duas fácies de ocorrência na região, o aquífero fraturado composto por siltitos (em marrom), e o aquífero representado pelos calcários e margas (em azul). Nota-se na representação que os calcários são lentes que ocorrem imersas em meio aos siltitos, como observado em campo. O Sistema Coluvionar configura a área de transição entre os outros dois aquíferos, e está representado em cor laranja como areias médias não estruturadas, por ser um litologia já extremamente inconsolidada. É importante verificar que abaixo do aquífero coluvionar há continuação do Sistema Aquífero Bambuí.

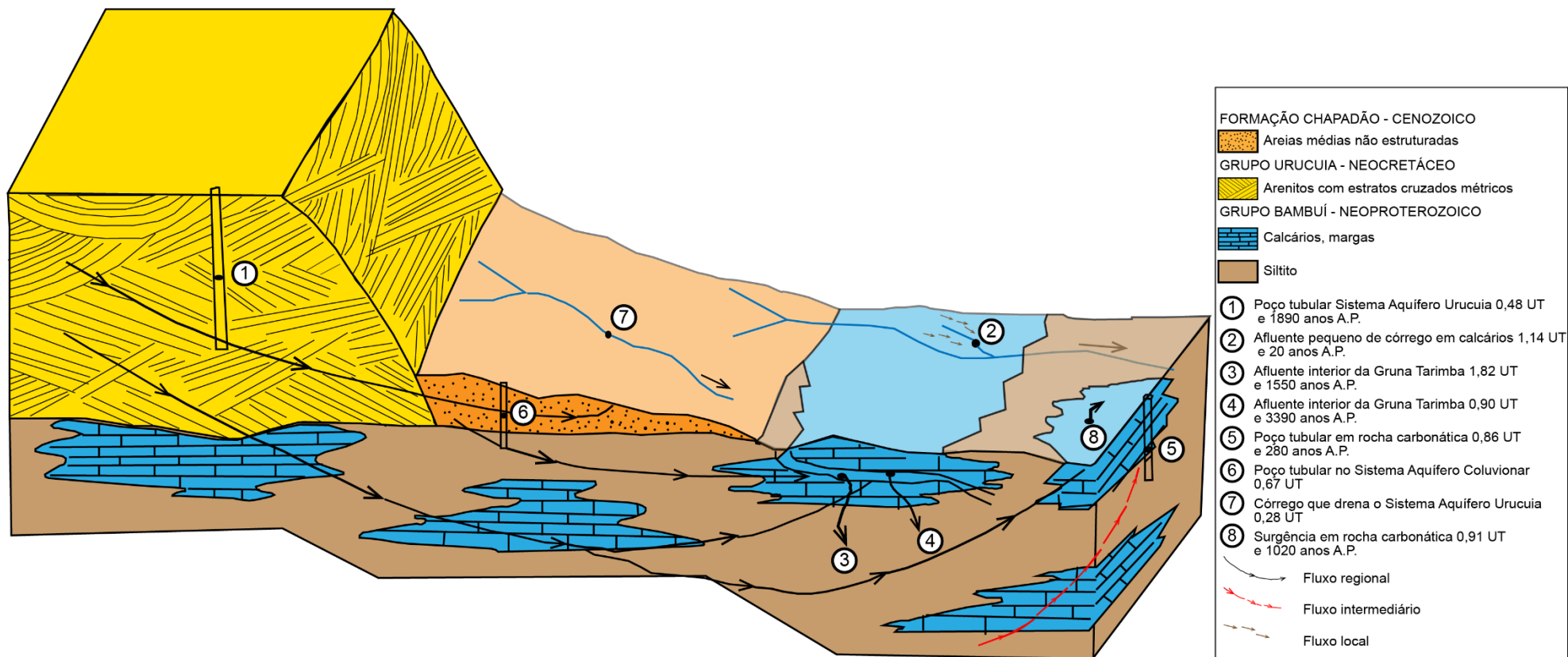


Figura 4.4 - Bloco diagrama esquemático mostrando os diferentes sistemas de fluxo hidrogeológico. Fluxo regional é originado pela recarga no platô do chapadão do Urucuia. No fluxo regional a água migra no interior do Sistema Aquífero Urucuia e pode interagir do com Sistema Aquífero Coluvionar e desaguar no sistema Aquífero Bambuí (exemplos, pontos 1 e 4). Fluxo intermediário a água tem menor tempo de permanência nos aquíferos em comparação ao fluxo regional (exemplo, ponto 5). Fluxo local é considerado a partir de águas oriundas do Sistema Coluvionar e em menor proporção águas infiltradas no próprio Sistema Bambuí. Fluxo local pode ocorrer em qualquer um dos sistemas aquíferos, sendo representado por descargas rápidas de águas infiltradas em diferentes tipos de solos que alimentam nascentes e cursos d'água intermitentes (exemplo, ponto 2).

O segundo elemento inserido no modelo são as linhas de fluxo representativas da dinâmica de escoamento na região. Foram representados três tipos de fluxo, o regional que percorre desde o Sistema Aquífero Urucuia, em maiores profundidades, até os colúvios da Formação Chapadão. Mas o que predomina de fato é o fluxo de base que percorre desde os arenitos até os siltitos e carbonatos em maiores profundidades.

Foram representados no modelo também os locais esquemáticos onde houve as amostragens de água para análises isotópicas com os respectivos resultados de trítio e radiocarbono. O poço tubular no sistema Urucuia é o local de coleta da amostra IMF-1, e é uma das águas com menor contribuição de recarga recente. O afluente de córrego em calcários é a amostra IMF-2, com elevada contribuição de recarga recente indicada por 1,14 UT.

A análise integrada das amostras IMF-1 e IMF-7 mostra grande coerência, pois a recarga no Aquífero Urucuia é lenta, por se tratar de uma condição de zona não saturada muito espessa. Por outro lado, na região do colúvio a recarga é eficiente e rápida, por representar uma faixa com zona vadosa pouco espessa. O afluente coletado no interior da Gruta Tarimba representado pela amostra IMF-3 é o ponto com contribuição de água recente, e que provavelmente é produzido pela infiltração e drenagem do próprio Sistema Bambuí ou ainda contribuição do Sistema Coluvionar que ocorre nas proximidades. Por outro lado, o afluente coletado na Gruta Tarimba representativo da amostra IMF-4 apresenta menor concentração de trítio, sendo possivelmente um ponto de exudação de suas águas diretamente produzidas pelo Sistema Aquífero Urucuia. É importante destacar que a diferença de idades entre estas amostras é maior que 100%.

A amostra IMF-5 coletada no poço tubular instalado em litologia carbonática apresenta uma quantidade de recarga recente significativa, o que é esperado para sistemas cársticos com amplo desenvolvimento de processo de dissolução.

O poço tubular da amostra IMF-6 localizado no colúvio sugere também que há menor contribuição meteórica quando comparado com os demais pontos. Outra provável explicação para este comportamento é a possibilidade de que o Sistema Urucuia tenha grande contribuição na vazão total, o que pode diluir o efeito da descarga de águas de recarga recente. Neste sentido, é importante destacar que em alguns casos, o conteúdo isotópico ou assinatura isotópica de uma água natural representa uma média ponderada de águas de distintas origens.

A amostra IMF-8 é da surgência cárstica encontrada na área de estudo, e apresenta um valor relativamente elevado de trítio, o que leva a considerar que há maior recarga de água meteórica no sistema.

4.2.1.1 Transferências de Águas

Um dos principais objetivos dos estudos hidrogeológicos é determinar as formas de transferências de águas dos diferentes compartimentos, desde a atmosfera até a superfície e para os aquíferos e em muitos casos entre diferentes aquíferos.

Neste sentido, a entrada primária da água para todos os aquíferos na região em estudo é a precipitação pluvial. As chuvas na região ocorrem de forma abundante (na faixa de 1300 mm/ano), mas com forte sazonalidade. O aspecto sazonal da precipitação restringe a recarga média, pois após longo período sem chuvas a zona não saturada permanece com baixa umidade e a cobertura vegetal mostra amplo déficit hídrico. As primeiras chuvas não resultam em recarga efetiva, de forma que estas águas são perdidas para reposição de umidade nos solos e pela vegetação.

Após alcançar a superfície do terreno, as águas de precipitação podem seguir dois caminhos: se infiltrar através da zona vadosa ou escoar pela superfície. Estes processos se dão de forma contrastante nos diferentes compartimentos da área em estudo, sendo que o escoamento é nulo sobre os sistemas Urucuia e Coluvionar e muito grande no Sistema Bambuí. Neste sistema heterogêneo há tendências distintas quando se analisa a porção fraturada em comparação com a porção cárstica. No carste em que há amplo desenvolvimento de feições de dissolução próximo à superfície (epicarste) há infiltração significativa. Na porção fraturada com solos rasos e argilosos sobre siltitos, a infiltração é mínima. Considerando que o escoamento e a infiltração são componentes complementares, pode-se afirmar que nos sistemas Urucuia e Aluvionar, toda a precipitação se infiltra na zona vadosa.

Em todos os compartimentos da região em estudo a maior perda de água que retorna para a atmosfera se dá por evapotranspiração. Este processo é responsável por retirar na bacia o maior volume da água que ingressou por precipitação.

Outro ponto fortemente contrastante entre os ambientes aquíferos na região em estudo é como a água é transmitida através dos meios geológicos (solos e rochas). Esta característica é o principal parâmetro que diferencia os ambientes.

Para os sistemas Urucuia e Coluvionar, por se tratar de meios intergranulares o fluxo é do tipo laminar e, portanto, a velocidade linear média é função da condutividade hidráulica, porosidade efetiva e gradiente hidráulico. Nestes casos, o tempo entre a entrada da água no sistema e sua volta à superfície nos exutórios é grande (centenas de anos). Esta feição resulta em aquíferos com alta capacidade de armazenamento, transmissão e regularização do ciclo hidrológico em que estejam vinculados, inclusive cursos d'água com os quais tenham conexão hidráulica.

O Sistema Aquífero Bambuí, com seus dois subsistemas e solos associados mostra um comportamento contrastante, em que os fluxos são rápidos e instantâneos, com restrita capacidade de regularização dos sistemas hídricos. Assim, estes aquífero têm capacidade limitada de produção hídrica regular ao longo do tempo, sendo similares a rios sob clima sazonal, apresentam ampla vazão no período de chuvas e baixa vazão ou até mesmo secam nos períodos chuvosos.

Outra componente importante na decomposição do ciclo hídrico da região é o escoamento interno ou *interflow*, que representa perdas de por parte da água infiltrada quando são interceptadas camadas em profundidade com contraste de condutividade hidráulica. Em geral este processo resulta em nascentes de restrita vazão intermitentes. Nos sistemas Urucua e Colúvio o interfluxo é considerado nulo, uma vez que a condutividade hidráulica é elevada e homogênea ao longo dos perfis de solos e nos corpos rochosos. Contudo, no Sistema Bambuí, principalmente na sua porção fraturada esta componente é significativa.

A Figura 4.5 mostra de forma esquemática e sintética a decomposição do ciclo hidrológico nos distintos compartimentos da área em estudo.

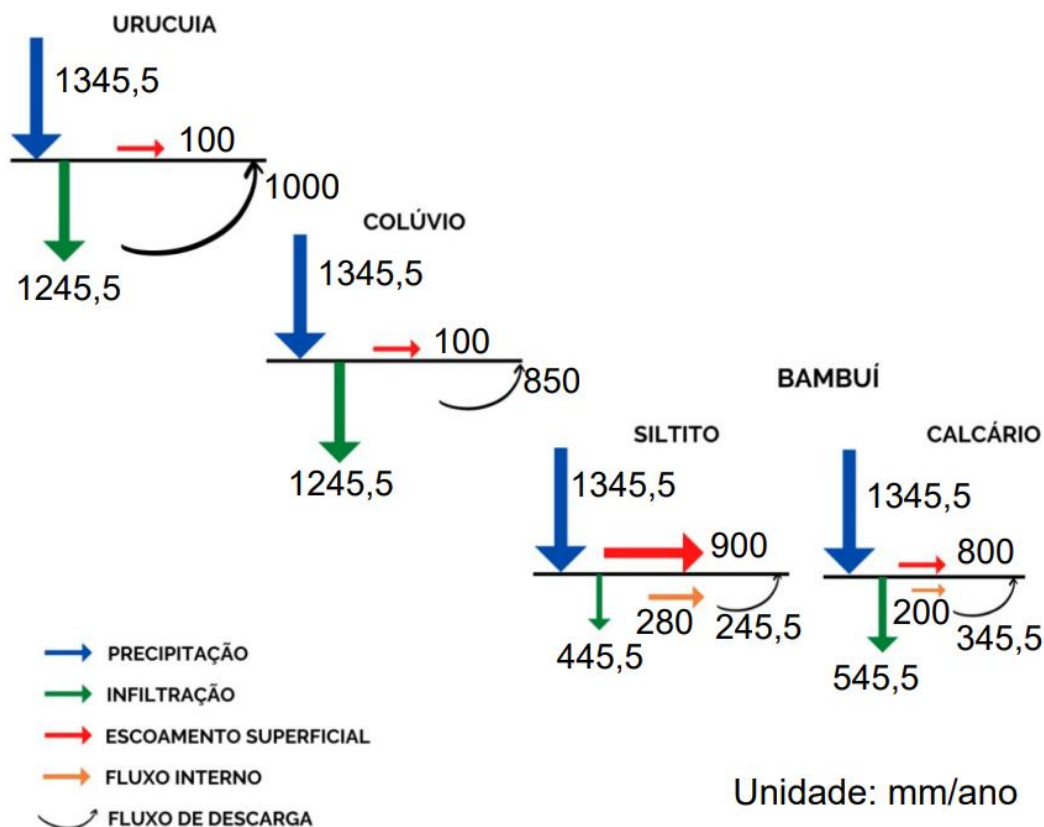


Figura 4.5 - Decomposição esquemática do ciclo hidrológico nos diferentes ambientes hidrogeológicos da região estudada. O tamanho das setas é proporcional ao desenvolvimento de cada processo. A precipitação é considerada igual em todos os ambientes. Os valores indicados são números de referência, exceto a precipitação que foi quantificada pelo INMET.

O principal controle das taxas de infiltração é a condutividade hidráulica na porção superior da zona vadosa. Uma vez que os maiores valores são encontrados em Latossolo e Neossolo Quartzarênico sobre os sistemas Urucuia e Coluvionar, as taxas de recarga são máximas nestes compartimentos. As porções da área onde ocorrem siltitos da Formação Lagoa do Jacaré, recobertos por Nitossolo Vermelho apresentam taxas de infiltração maiores do que as observadas sobre margas e lentes de calcário (em geral recobertas por Argissolo Vermelho). Entretanto, mesmo sendo maiores que as do carste, ainda assim são taxas de infiltração muito baixas, em comparação com a recarga em material de textura arenosa (Neossolo e Latossolo). Na Figura 4.5 as diferentes etapas do ciclo estão representadas por setas de tamanho proporcional à sua intensidade de ocorrência em cada meio, e os valores em mm/ano são números de referência compilados da literatura, exceto a precipitação, que é a Normal medida de 1991 a 2020, e disponibilizada Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

4.2.1.2 Análise Potenciométrica e Bacias Hidrogeológicas

Na região de Mambá e arredores, até Alvorada do Norte e da divisa dos estados em direção a leste, não foi encontrado um número significativo de poços em funcionamento, e os poucos existentes não possuem dados cadastrados no SIAGAS (CPRM). Esta situação dificultou consideravelmente a obtenção de dados para a análise da potenciometria na área.

A análise potenciométrica foi realizada de forma alternativa para os diferentes sistemas presentes na área. Tradicionalmente o que se faz é, coletar valores de nível d'água (nível estático) nos poços e nascentes, e os valores de cota da superfície (altimetria). Os valores das cargas potenciométricas são obtidos com a subtração da cota na superfície do nível d'água. Para o caso de nascentes, o nível d'água considerado é igual à cota do terreno, pois se considerada que este ponto representa o afloramento da superfície potenciométrica. Em posse das cotas potenciométricas, é realizada a interpolação em software específico de geoprocessamento (ex. Surfer, ArcGis, QGis, Geosoft ou outros).

No caso do presente projeto, o principal problema enfrentado foi a dificuldade de medição dos níveis estáticos em campo, especialmente na região onde ocorre o Grupo Bambuí. Os poços em funcionamento são raros, e não há banco de dados com registro de valores pretéritos que pudesse ser utilizado. Na região de ocorrência do Grupo Urucuia encontrar poços em funcionamento não foi problema, porém a grande maioria desses localiza-se na região a leste do município de Jaborandi, já muito distante da porção de interesse deste estudo. Na faixa de ocorrência do Colúvio, entre o Grupo Bambuí e o Grupo Urucuia, foi enfrentada a mesma dificuldade com relação à poços em funcionamento onde se pudesse medir os níveis estáticos.

Ao final do projeto foi possível obter de alguns dados de nível d'água em nascentes, na

região dos aquíferos Coluvionar e Urucuia, e alguns dados de nível estático na área de ocorrência do Grupo Urucuia. A partir destes valores foi possível estabelecer a superfície potenciométrica e o divisor das bacias hidrogeológicas. O divisor estabelece um fluxo para leste (em direção à bacia do São Francisco) e outro para oeste (em direção à bacia do Tocantins).

A carta-imagem da Figura 4.6 mostra o eixo aproximado do divisor hidrogeológico regional na área estudada.

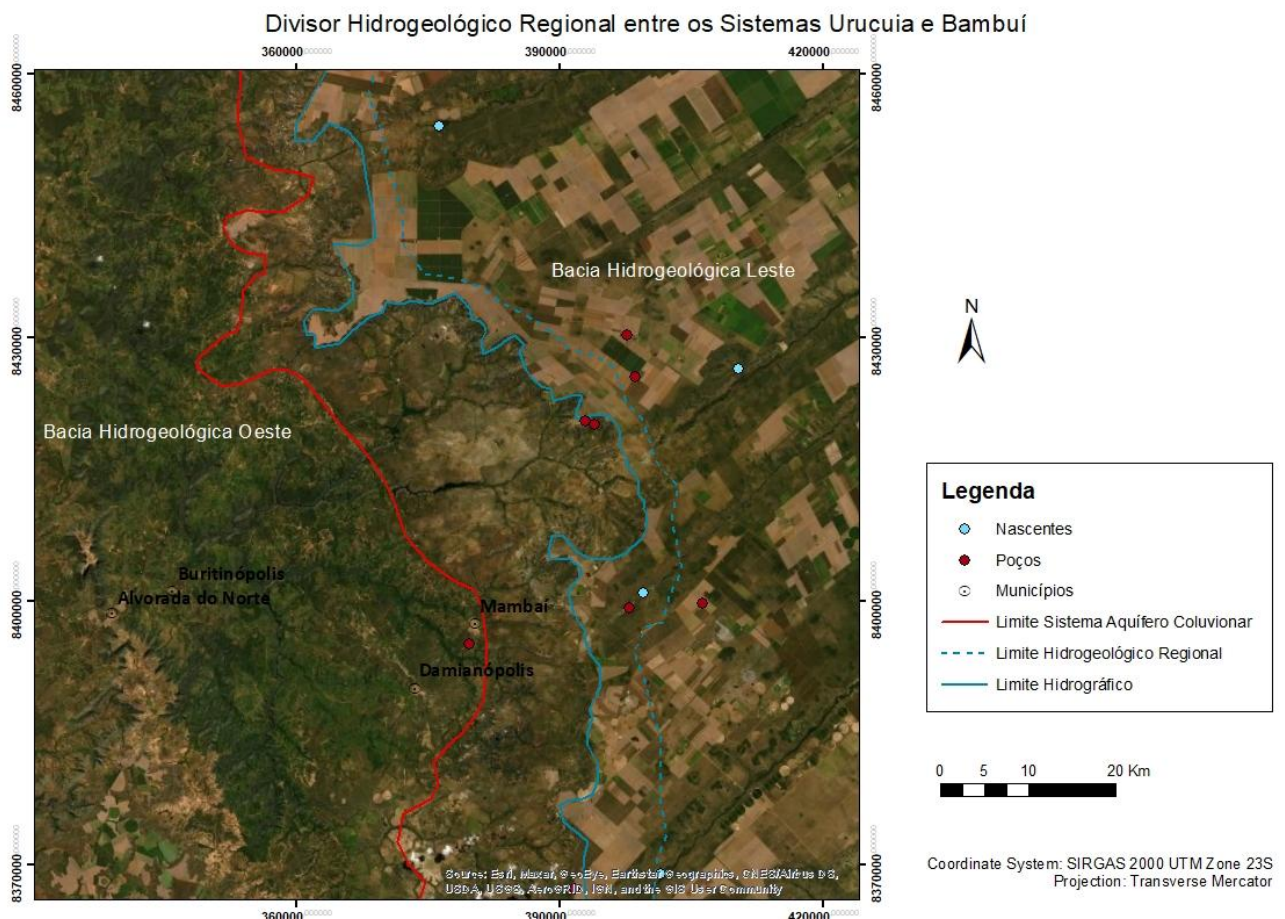


Figura 4.6 - Carta-imagem da divisão regional das bacias hidrogeológicas na região estudada. A linha azul contínua representa o limite hidrográfico aproximado. A linha azul tracejada representa o limite entre as bacias hidrogeológicas de leste e de oeste. A linha vermelha marca o limite da bacia do Sistema Aquífero Coluvionar, que integra a bacia hidrogeológica de oeste.

A divisão assimétrica entre as bacias hidrográficas e hidrogeológicas, implica no estabelecimento de fluxo subterrâneo em que há uma componente do Sistema Aquífero Urucuia que alimenta o Sistema Aquífero Bambuí, no estado do Goiás, além da rede de drenagem superficial principal que drena para oeste.

Na região de ocorrência do Sistema Aquífero Bambuí as diretrizes são diferentes, pois a análise potenciométrica em meio fraturado e cárstico é mais complexa, uma vez que as características intrínsecas do sistema determinam várias superfícies potenciométricas distintas, e não apenas uma relativamente contínua, como ocorre nos casos de aquíferos intergranulares.

Logo, para o sistema Bambuí esta análise teria que ser feita com a individualização de compartimentos, a partir da caracterização dos grandes lineamentos regionais, retirados de imagens de satélite ou imagens aéreas com boa visualização das grandes estruturas. Após definidos os grandes lineamentos e os compartimentos por eles determinados, a análise potenciométrica como descrita anteriormente deveria ser feita para cada bloco individualmente. Método similar foi proposto por Oliveira et al. (2022) para a área de estudo do presente projeto.

A assimetria entre os divisores superficiais e subterrâneos traz inúmeras implicações para os recursos hídricos regionais e inclusive para outros aspectos fisiográficos regionais. A intensa carstificação observada na região de Mambaí, GO (que conta a terceira maior caverna brasileira, a Gruta da tarimba), tem seu controle vinculado à descarga do Sistema Aquífero Urucuia em direção a oeste. Como estas águas são moderadamente a fortemente ácidas a carstificação é intensificada. A formação dos extensos cânions observados no vale dos rios Vermelho, Buritis e Corrente, sem dúvida, tem controle vinculado às águas ácidas que percolam as principais fraturas em camadas horizontalizadas.

A própria perenização dos principais cursos d'água tributários do rio Paranã é exclusivamente explicada pela assimetria entre os limites hidrográfico e hidrogeológico. Os dados mostram que caso os limites fossem simétricos bacias fossem os rios seriam intermitentes ou teriam vazões mínimas no período de recessão das chuvas.

Outro aspecto importante é o fato de que o Sistema Aquífero Coluvionar funcionar como um prolongamento do Sistema Aquífero Urucuia em direção a oeste. Neste caso, pode-se afirmar que de forma indireta a assimetria fica ainda mais pronunciada, pois a descarga do reservatório vinculado aos colúvios é integralmente para oeste.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Diante das informações coletadas e discutidas, as principais conclusões alcançadas pela integração das interpretações incluem:

- ✓ Na região estudada são reconhecidos três sistemas aquíferos: Urucuia, Coluvionar e Bambuí, sendo que este pode ser dividido em dois subsistemas, um cárstico e outro fraturado.
- ✓ Os aquíferos Urucuia e Coluvionar são do tipo intergranular, homogêneo, isotrópico e apresentam condutividade hidráulica elevada, tanto da sua zona vadosa quanto da zona saturada.
- ✓ A principal diferença entre os aquíferos Urucuia e Coluvionar é vinculada à sua transmissividade. O Sistema Urucuia tem transmissividade de 10 a 100 vezes maior que a observada no Sistema Aquífero Coluvionar.
- ✓ O sistema Aquífero Bambuí apresenta valores de condutividade hidráulica da zona vadosa restritos.
- ✓ Os aquíferos intergranulares apresentam função reguladora muito bem desenvolvida, enquanto que no Sistema Aquífero Bambuí esta função é mínima ou em grande parte da área ausente.
- ✓ Sistemas de fluxo regionais são reconhecidos na área, principalmente aqueles iniciados pela infiltração da água através do Sistema Aquífero Urucuia. Esta afirmação é corroborada pelas idades de águas reconhecidamente produzidas nesta unidade hidroestratigráfica.
- ✓ As águas antigas obtidas em poços e sistemas de cavidades no aquífero Bambuí, são na prática, produzidas nos aquíferos intergranulares e transferidas por fluxo regional.
- ✓ Os dados de trítio comprovam que a recarga do Sistema Aquífero Urucuia na região é lenta. Este dado é coerente com a espessura da zona não saturada que supera os 100 metros.
- ✓ O Sistema Aquífero Bambuí, particularmente sua porção cárstica, tem restrita capacidade de produção hídrica, funcionando como um ambiente de rápida drenagem e escoamento. A porção fraturada do Aquífero Bambuí na região funciona como um reservatório passivo, com restrita produção hídrica e se destacando como um ambiente em que os processos hidrológicos de fluxo lateral predominam.
- ✓ De forma enfática, pode-se afirmar que se os sistemas intergranulares não existissem na porção limítrofe entre os estados da Bahia e Goiás, todos os afluentes da margem direita

do rio Paranã seriam intermitentes. Em outras palavras, a perenização do rio Corrente e seus tributários é exclusivamente controlada pelos aquíferos Urucuia e Coluvionar.

- ✓ A composição química das águas demonstra que amostras associadas unicamente aos sistemas Urucuia e Coluvionar apresentam caráter ácido e com baixa mineralização total. Os dados também mostram que as águas obtidas de cursos d'água que fluem sobre o Sistema Bambuí, na prática são misturas de águas alcalinas com águas mais ácidas. Da mesma forma, a mineralização destas águas indica se tratar de águas mistas. Apenas amostras obtidas de poços ou nascentes exclusivamente vinculadas aos carbonatos indicam maiores valores de pH (até maiores que 8,0) e maior mineralização total (da ordem de centenas de mg/L).
- ✓ A decomposição do ciclo hidrológico nos diferentes compartimentos mostra que o escoamento superficial é máximo nos solos sobre siltitos da Formação Lagoa do Jacaré, e considerado nulo sobre os aquíferos Urucuia e Coluvionar.
- ✓ Na região existe assimetria entre os divisores das bacias hidrográficas (em superfície) e as bacias hidrogeológicas (em profundidade). Parte da água que se infiltra em área correspondente à bacia do rio São Francisco, flui através do aquífero em direção à bacia do rio Tocantins.
- ✓ O comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero Coluvionar é considerado muito eficiente, sendo desempenhadas as funções filtro, reguladora e de reservatório. Neste sentido, a assimetria entre as bacias hidrogeológicas e hidrográficas fica mais pronunciada, uma vez que o aquífero coluvionar se situa a oeste do divisor hidrogeológico regional.
- ✓ A integração de dados geológicos, pedológicos, hidráulicos, hidroquímicos e isotópicos se mostrou efetiva para o entendimento da dinâmica entre aquíferos como na região estudada. De forma geral houve boa convergência entre os diferentes dados.

Por fim, considera-se que o presente trabalho alcançou os objetivos que se propôs com a elaboração de um modelo conceitual que descreveu qualitativamente a dinâmica de fluxo entre os aquíferos Urucuia, Bambuí e Coluvionar, e determinação das duas principais bacias hidrogeológicas na região.

5.2 Recomendações

Dentre as sugestões e recomendações para um aprimoramento do modelo conceitual elaborado para a área, devem ser considerados:

- ✓ Realizar estudos de isótopos estáveis de estrôncio, uma vez que a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ funciona como um indicador da interação rocha-água nos sistemas

hidrogeológicos, e não foi possível elucidar completamente esta questão apenas com uso dos isótopos estáveis e radiogênicos (^{14}C e trítio).

- ✓ Intensificar os estudos isotópicos com maior número de pontos amostrais para se corroborar e se estabelecer uma estatística de dados. A composição de uma linha meteórica local pode ser de grande valia para estudos futuros.
- ✓ Desenvolver estudo potenciométrico com obtenção de mais dados de carga hidráulica de poços de captação de água, ou poços de monitoramento, principalmente na região da fronteira entre os estados da Bahia e Goiás, de forma a se detalhar as áreas de assimetria entre as bacias hidrográficas e hidrogeológicas.
- ✓ Propor um sistema de gestão compartilhada do Sistema Aquífero Urucua com representantes técnicos dos estados da Bahia e de Goiás, uma vez que os recursos hídricos no nordeste do estado de Goiás são fortemente dependentes deste importante aquífero nacional brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKMIN, F. F. Geologia do Continente Sul-americano: Evolução da Obra de Fernando Marques de Almeida. O que faz de um cráton um cráton?, 575-592. 2004.
- ALMEIDA, L; RESENDE, L; RODRIGUES, A.P; CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Superintendência de Geologia de Mineração, Governo de Estado de Goiás. 230p. 2006.
- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**(1):81-89. 2007.
- ARRAES, T.M.; CAMPOS, J.E.G. Aplicação de ensaio de traçador e dados de potenciometria como ferramentas para a delimitação de bacias hidrogeológicas. *Geociências (São Paulo. Online)*, **29**:623-631. 2010.
- ARRAES, T.M. Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas. Dissertação (Mestrado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 125p. 2008.
- BETA ANALYTIC. Datação por Radiocarbono de águas subterrâneas – Conceito e Aplicação Prática. Disponível em: C14 Datação de Águas Subterrâneas Aplicação Prática (radiocarbon.com), 2021.
- CAMPOS, J.E.G. Estratigrafia, sedimentação, evolução tectônica e geologia do diamante da porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Tese de Doutorado, 204p. 1996.
- CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. Balanço térmico aplicado à recarga artificial dos aquíferos da região de Caldas Novas, estado de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* **42**(1):196-207. 2012.
- CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geociências* **27**(3):269-282. 1997.
- CLARK, I. D.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press, Jul 23, 1997 - Science - 352 pages. 1997.
- CNRH 2001. *Resolução nº15, de 11 de janeiro de 2001*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 22 de janeiro de 2001.
- CNRH 2002. *Resolução nº22, de 24 de maio de 2002*. Conselho Nacional de Recursos Hídricos, Diário Oficial da União, publicado em 04 de julho de 2002.
- CONAMA 2001. Resolução CONAMA nº 279, de 27 de Junho de 2001. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 29/06/2001.
- CONAMA 2008. Resolução CONAM nº 396, de 3 de Abril de 2008. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Diário Oficial da União, publicado em 7/04/2008.
- CORNIELLO A.; DUCCI, D.; MONTI, G.M. *An integrated approach for the delimitation of a groundwater basin: the case study of the Conca di Acerno (Campania, southern Italy)*. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue 1*. 2017.
- COSTA, W.D. Uso e gestão de água subterrânea. In: Feitosa, F.A.C; Manoel Filho. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 2a ed. Rev. e Ampl. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, RJ. p. 341-367. 2000.
- CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**: 1702-1703. 1961b.
- CRUZ, A. B. Detalhamento da geologia das unidades carbonáticas do Grupo Bambuí na região de Alvorada do Norte, Goiás. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2012.
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *Anais do*

- XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, 1978. V. 2.
- DEMIROGLU, M. Identifying the groundwater basin boundaries, using environmental isotopes: a case study. 2016.
- FEITOSA, E.C. Pesquisa de Água Subterrânea. In: A.C.F. Feitosa & J. Manoel Filho (ed.) Hidrogeologia: Conceitos e aplicações, Fortaleza, CPRM/LABHID, 53-80. 1997.
- FEITOSA, A.C.F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMÉTRIO, J.G.A. (Coord.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM/LABHID. Rio de Janeiro. 3a ed. Ampliada e Revisada. 812p. 2008.
- GASPAR, M.T.P. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 148p. 2006.
- GUNN, J. Contributory area definition for groundwater source protection and hazard mitigation in carbonate aquifers. *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis, and Mitigation*. Geol Soc Lond 279:97-109. 2007.
- JUNQUEIRA, T.P. Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO): estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 101p. 2020.
- KOHNKE, M.W. Atenuação natural de contaminantes, metodologias para a delimitação do perímetro de proteção de poços (PPP). *ABAS Informa*, S.Paulo, **121**:9-10. 2001.
- LIBBY, W. F. *Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation*. *Physical Review*, 69:671-672. 1946.
- LOBO-FERREIRA J.P. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: APRH, Congresso da Água, 4, Lisboa, *comunicações*, 1-16. 1998.
- PALMER, A.N. Understanding the hydrology of karst. *Geol Croat* 63:143-148. 2010.
- PUTRANTO, T.T., LUTHFI M.I. Aquifer system, recharge-discharge zone and groundwater basin boundary mapping to support open and transparent water data, case study: Karangobar Groundwater Basin. 2019.
- REBOUÇAS, A.C. Água subterrânea no sistema nacional de gerenciamento dos recursos hídricos. *ABAS Informa*, São Paulo, **154**:3. 2005.
- SILVA, G.C. Aplicação do isótopo radioativo de carbono (^{14}C) na determinação de tempos de residência em aquíferos. *Derbyana*, São Paulo, 42: e743, 2021.
- VILLASEÑOR, E.M., MEGDAL, S.B. *The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration*. *Water* 2021, 13, 530. 2021.
- TIEDMAN, R.C.; GOODE D.J.; HSIEH P.A. Characterizing a ground water basin in New ENGLAND MOUNTAIN AND VALLEY TERRAIN. *GROUND WATER*, 36(4):611-621. 1998.
- TOSCANO, G.L.G.; SANTOS K.M.; ALMEIDA C.N.; SILVA T.C. UMA SÍNTESE ANALÍTICA SOBRE LEGISLAÇÃO DE PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL. XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 2008.
- WHITE, W.B. KARST HYDROLOGY: RECENT DEVELOPMENTS AND OPEN QUESTIONS. *ENG GEOL* 65:85-105. 2002.