



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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS ÁGUAS**  
**SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO BAMBUÍ (BAHIA, BRASIL)**

**Júlio Vieira Carvalho**

SALVADOR

2018

# **HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO BAMBUÍ (BAHIA, BRASIL)**

**Júlio Vieira Carvalho**

*Orientador : Prof. Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento*

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

SALVADOR

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Carvalho, Júlio Vieira  
Hidrogeoquímica e Isótopos Estáveis das Águas  
Subterrâneas do Aquífero Bambuí (Bahia, Brasil) / Júlio  
Vieira Carvalho. -- Salvador, 2018.  
53 f. : il

Orientador: Sérgio Augusto de Moraes Nascimento.  
Dissertação (Mestrado - Geologia) -- Universidade  
Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia, 2018.

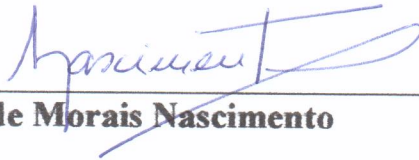
1. Hidrogeologia. 2. Aquífero Bambuí. I. de Moraes  
Nascimento, Sérgio Augusto. II. Título.

**JÚLIO VIEIRA CARVALHO**

**“HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEA DO AQUÍFERO BAMBUÍ  
(BAHIA, BRASIL)”**

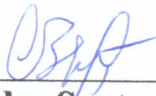
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, em 28/06/2018.

**DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:**



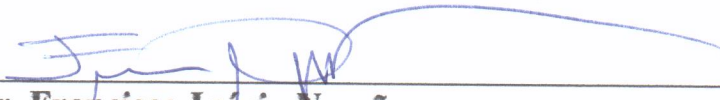
---

**Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento**  
Orientador – UFBA



---

**Dr. Cristovaldo Bispo dos Santos**  
Examinador Externo – CPRM



---

**Dr. Francisco Inácio Negrão**  
Examinador Externo – CPRM

Salvador – BA  
2018

## **AGRADECIMENTOS**

É com enorme satisfação que finalizo mais esta etapa da minha vida. Foi muito gratificante poder ter iniciado e concluído essa pesquisa, na qual pude aprimorar meus conhecimentos nas geociências, sobretudo no ramo da hidrogeologia, além de enxergar o quanto ainda posso evoluir academicamente.

Diante das dificuldades enfrentadas ao longo deste período, sou eternamente agradecido a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu pudesse conseguir alcançar meu objetivo de concluir bem este presente trabalho.

Sou grato primeiramente a minha família, minha mãe Denise, meu pai José, meus irmãos Natália e Maurício, e minha companheira Marina, eles são a base de tudo.

Agradeço muito também ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Nascimento e ao professor Dr. Luís Rogério, por terem me dado a oportunidade de trabalhar nesta pesquisa e pelos ensinamentos.

Sou bastante agradecido aos meus colegas/amigos do grupo de pesquisa Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, como Cesinha, Tiagão, Calabresa, Alemão, Clélia, Rogério, Renilda, além de todos os professores e a secretária Ritinha.

Agradeço também a coordenadora do programa de pós-graduação em geologia da UFBA, professora Dr. Simone Cruz, por estar sempre em busca das melhores condições de ensino para os estudantes do programa, e ao CAPES pela bolsa de mestrado.

Finalmente agradeço aos membros da banca, pelas contribuições nesse trabalho.

A todos vocês meu muito obrigado e eterna gratidão.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo compreender a composição hidrogeoquímica e isotópica estável das águas subterrâneas do aquífero Bambuí, localizado na região sudoeste da Bahia, dando ênfase na classificação geoquímica, processos de salinização, qualidade e dinâmica de recarga. Estas águas subterrâneas vêm sendo cada dia mais utilizadas no abastecimento humano, muito em função da crescente escassez das águas superficiais, resultante de grandes períodos de estiagem anuais. O entendimento sobre a composição química, físico-química e isotópica das águas subterrâneas colabora para uma melhor gestão desse importante bem natural. Para efetuar essa pesquisa, foram coletadas 15 amostras de águas subterrâneas, para análises químicas, físico-químicas e isotópicas, em poços tubulares contidos em rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí de idade neoproterozóica. Os resultados analíticos demonstraram a classificação hidrogeoquímica quanto à presença de íons maiores dissolvidos nas águas, estando a maior parte das amostras classificadas como bicarbonatadas cálcicas, típica de aquíferos cársticos. Para o entendimento do processo de salinização foi realizada análises estatísticas, revelando que o sulfato, cloreto e alcalinidade são os parâmetros que mais influenciam na condutividade elétrica. A qualidade dessas águas foi definida a partir dos padrões de potabilidade, indicados pela Organização Mundial da Saúde (WHO) (2003) e pela Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o qual demonstra que a maioria das águas são impróprias para consumo humano, devido a elevada dureza das águas cársticas, e principalmente pelas altas concentrações de nitrato em quase metade das águas coletadas. Para determinar a assinatura isotópica, foram utilizados os isótopos estáveis de deutério e oxigênio 18 ( $\delta^2\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ). O resultado das análises revelou que todas as águas possuem valores negativos, sugerindo que a dinâmica de recarga das águas subterrâneas seja feita por infiltração rápida no sistema aquífero.

Palavras-Chave: Hidrogeoquímica; Isotópica; Águas Subterrâneas; Bambuí.

## ABSTRACT

This work aims to understand the stable hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater of the Bambuí aquifer, located in the southwestern region of Bahia, emphasizing the geochemical classification, process of salinization, quality and recharge dynamics. These groundwater have been increasingly used in Community water supplies, due to the increasing scarcity of surface water resulting from long periods of annual drought. The understanding of the chemical, physical-chemical and isotopic composition of groundwater contributes to a better management of this important natural good. To carry out this research, 15 samples of groundwater were collected for chemical, physical-chemical and isotopic analyzes, in tubular wells contained in carbonaceous and pelito-carbonatic rocks of the Neoproterozoic Bambuí Group. The analytical results demonstrated the hydrogeochemical classification of the presence of larger dissolved ions in the waters, being the majority of the samples classified as bicarbonated calcium, typical of karst aquifer. For the understanding of the salinization process, statistical analyzes were performed, revealing that sulfate, chloride and alkalinity are the parameters that most influence the electrical conductivity. The quality of these waters was defined from the standards of potability, indicated by the World Health Organization (WHO) (2003) and Resolution No. 396/2008 of the National Environmental Council (CONAMA), which shows that most of the waters are unfit for human consumption, mainly due to the occurrence of high concentrations of nitrate. To determine the isotopic signature, the stable isotopes deuterium and oxygen 18 ( $\delta^{2D} / \delta^{18O}$ ) were used. The result of the analyzes revealed that all waters have negative values, suggesting that the dynamics of groundwater recharge is made by rapid infiltration into the aquifer system.

Keywords: Hydrogeochemistry; Isotopic; Groundwater; Bambuí.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO 3 - ARTIGO 1: HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO BAMBUÍ (BAHIA, BRASIL).....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>47</b>
<b>APÊNDICE A - JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO A - BANCO DE DADOS.....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO B - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....</b>	<b>53</b>



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Introdução

Esta dissertação compreende uma síntese de estudos integrados, utilizando dados sobre a química, físico-química e isótopos estáveis, hidrogênio 2 (deutério) e oxigênio 18 ( $\delta^2D/\delta^{18}O$ ), das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bambuí, localizado na região sudoeste do estado da Bahia (figura 1). As águas do aquífero Bambuí, vem sendo cada vez mais requisitadas como alternativa de uso diante da crescente escassez das águas superficiais ao longo da região hidrográfica do São Francisco, tornando-se cada vez mais importante o conhecimento sobre a qualidade, e as características destas águas subterrâneas por parte dos gestores.

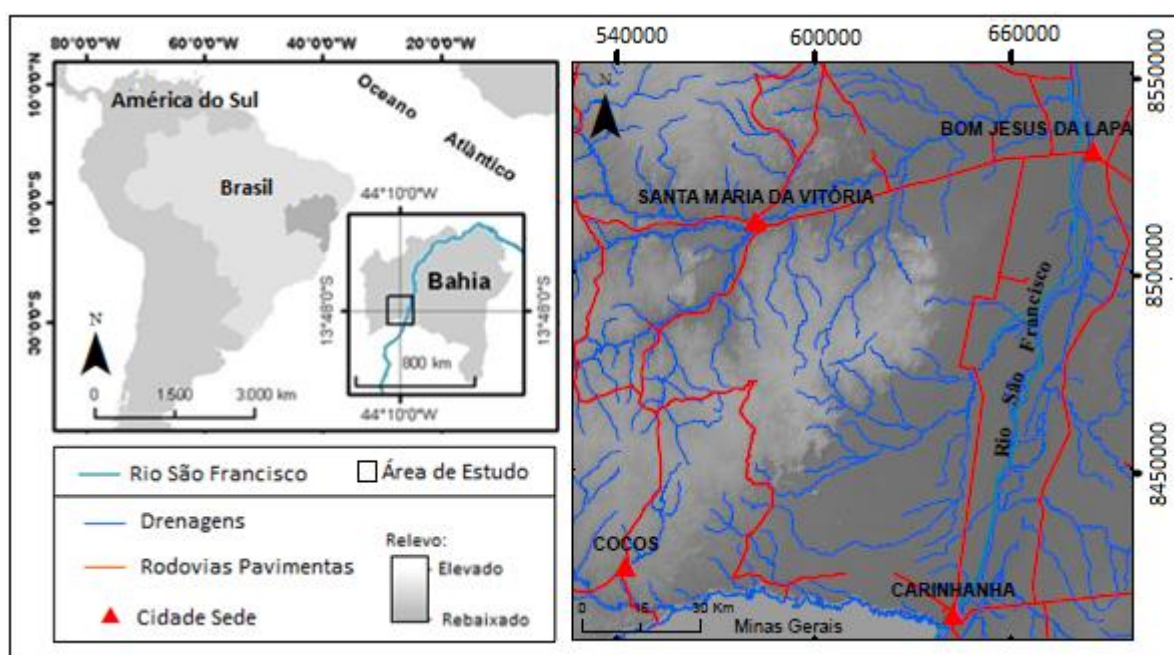


Figura 1: Mapa de Localização da área de estudo. *Figure 1: Location Map of the study área.*

O sistema aquífero em estudo está inserido no contexto geotectônico do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977), sendo composto essencialmente por rochas

sedimentares carbonáticas e pelito-carbonáticas associadas a sistemas marinhos de idade neoproterozóica, que constituem a unidade geológica Grupo Bambuí (Rimann 1917). Em relação a hidrogeologia, o aquífero Bambuí, representa um aquífero morfologicamente heterogêneo, com grande variação em termos de características hidrogeológicas e disponibilidade hídrica, apresentando na maioria dos poços vazões variando entre 4 e 25 m<sup>3</sup>/h e profundidade entre 66 e 100 m (DNMP/CPRM 1981). Essa variação ocorre devido à natureza cárstica e fissural das sequências carbonáticas e pelito-carbonáticas, resultando em regiões com diferentes níveis ou graus de carstificação e fraturamento.

Na região sudoeste da Bahia, a maior área do Sistema Aquífero Bambuí apresenta um elevado grau de carstificação em virtude do grande volume de rochas carbonáticas, presentes nas formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, constituindo assim a unidade hidrogeológica cárstica. Intercalada e subordinada a unidade cárstica ocorre a unidade pelito-carbonática (Gonçalves, 2014), de natureza predominantemente fraturada. De modo geral, as áreas com maior produtividade de água no Aquífero Bambuí correspondem às áreas cársticas (Zobby *et al.*, 2004).

Sobre a caracterização química e físico-química, e qualidade das águas subterrâneas, estudos anteriores demonstram que as águas do aquífero Bambuí são essencialmente bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas, com predomínio dos tipos cálcicos, possuindo caráter levemente alcalino, com significativo teor de STD (sólidos totais dissolvidos), refletindo assim a interação da água com a rocha calcária (Ramos e Paixão, 2003). Estas águas possuem qualidade aceitável a imprópria Oliveira *et al.*, 2007, devido a elevada concentração de carbonato de cálcio e magnésio das águas, diretamente proporcional a dureza, não sendo, a princípio,

indicada para o consumo humano, entretanto na maioria dos poços da região essas águas podem ser utilizadas nas atividades agropecuárias e em trabalhos domésticos.

As investigações convencionais referentes a hidrodinâmica e hidroquímica são, muitas vezes, insuficientes à compreensão da evolução das águas no ciclo hidrológico. Esse conhecimento complementar pode ser obtido usando o auxílio dos métodos de investigação isotópica (Han e Lui, 2004, Barbieri *et al.*, 2005). Os isótopos estáveis da molécula da água, ou dissolvidos nesta, variam previsivelmente no ciclo hidrológico (Clark; Fritz *et al.*, 1997). Publicações sobre isótopos estáveis na área de pesquisa revelam que, no Aquífero Bambuí, há uma contribuição da recarga pelas águas das chuvas locais, com baixa evaporação, resultando em águas com valores isotópicos negativos (Camurugy, 2009). Através do agrupamento dos dados referentes à hidroquímica, físico-química e isótopos estáveis ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ ) das águas subterrânea do Aquífero Bambuí, busca-se o melhor entendimento sobre o fluxo, classificação, salinização, qualidade e recarga desse importante bem natural para o abastecimento comunitário.

## **1.2 Objetivos e Justificativa**

A finalidade desta pesquisa científica é investigar a evolução da composição hidroquímica, físico-química e isotópica estável ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ ) das águas subterrânea do Aquífero Bambuí na região sudoeste da Bahia. Tem-se por objetivos específicos: (i) montar um banco de dados (Anexo A) com todos os poços cadastrados pelo SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) /CERB (Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia), na área de estudo, que possuem informações sobre a hidrogeologia e a hidroquímica; (ii) definir o fluxo das águas subterrâneas através da elaboração de um mapa potenciométrico; (iii) coletar

amostras das águas subterrâneas e realizar análises hidroquímicas visando a classificação de sua composição; (iv) medir *in situ* parâmetros físico-químicos para caracterizar o caráter e a salinização dessas águas; (v) fazer análise estatística geral (dados do SIAGAS/CERB mais dados obtidos no campo) sobre os elementos que mais influenciam na Condutividade Elétrica (CE) dessas águas; (vi) avaliar a adequabilidade das águas subterrâneas para consumo humano, animal e uso na irrigação; (vii) realizar análises isotópicas  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  nas águas coletadas, buscando o entendimento da recarga (origem) e circulação dessas águas no ciclo hidrológico local.

Sabendo que a maior parte da área de estudo está inclusa na região do “polígono das secas” (MIN, 2005), o acesso às águas superficiais (rios, riachos, lagos e açudes) tem se tornado cada vez mais restrito. Associado também à crescente demanda por recursos hídricos das comunidades locais para o abastecimento humano, agricultura e dessedentação animal, faz-se necessário a utilização das águas subterrâneas. O aquífero Bambuí é uma importante alternativa de fonte para captação hídrica, exigindo assim um conhecimento sobre a composição/salinidade, qualidade das águas e as áreas de recarga. Estas informações podem auxiliar na busca pela gestão adequada dos diversos usos dessas águas, além da contribuição científica no estudo da caracterização química, físico-química e isotópica estável ( $\delta^{2}\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ) das águas do sistema aquífero Bambuí em escala regional.

### **1.3 Formato da Dissertação**

A presente dissertação está organizada na forma de artigo científico, sendo dividida em 4 capítulos. O capítulo 1 corresponde “Introdução Geral”, aborda à apresentação, objetivos e justificativa do trabalho. O capítulo 2 “Descrição da Área de Estudo” realiza uma abordagem física local (contexto geológico, aspectos fisiográficos

e hidrogeologia). O capítulo 3 representa o artigo intitulado “Hidrogeoquímica e Isótopos Estáveis das Águas Subterrâneas do Aquífero Bambuí (Bahia, Brasil)”. Este artigo está no formato de submissão para Revista Brasileira de Águas Subterrâneas, periódico de circulação nacional. A revista em questão apresenta conceito CAPES B2, atendendo aos requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA.

Finalizando a dissertação, tem-se o capítulo 4, “Conclusões Gerais”, trazendo todas às conclusões e algumas recomendações.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M. **O Cráton do São Francisco**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.7, n.4, p. 349-364, 1977.

BARBIERI M, BOSCHETTI T, PETITTA M, TALLINIM (2005) **Stable isotope ( $2\text{H}$ ,  $18\text{O}$  and  $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ ) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, central Italy)**. Appl Geochem 20:2063–2081.

CAMURUGY, E. B. **Uso da hidroquímica e isótopos estáveis ( $\delta\text{D}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) no estudo da qualidade e origem das águas subterrâneas do aquífero cárstico da região oeste do Estado da Bahia**. Monografia de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Salvador, 2009. 66 p.

CLARK, I. D., AND P. FRITZ. **Environmental isotopes in hydrogeology**. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL; COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS **Mapa hidrogeológico do Brasil**. (Escala: 1:5.000.000). Recife:CPRM, 1981.

GONÇALVES, MANUEL VITOR PORTUGAL. **Flúor nas águas subterrâneas do Aquífero Bambuí no Sudoeste da Bahia (Brasil)** / Manuel Vitor Portugal Gonçalves. – Salvador, 2014. 193 f.: Color.

HAN G, LUI CQ (2004) **Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province**. China Chem Geol 204:1–21.

KOHFAHL, C. *et al.* **Recharge Sources and Hydrogeochemical Evolution of Groundwater in Semiarid and Karstic Environments: A Field Study in the Granada Basin (Southern Spain.)** *Applied Geochemistry*, v. 23, p. 846–862, 2008

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Relatório de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semiárido Nordestino e do Polígono das Secas.** Brasília, 2005.

OLIVEIRA, I.B., NEGRÃO, F.I., SILVA, A.G.L.S. **Mapeamento dos Aquíferos do Estado da Bahia utilizando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS.** *Revista Científica Água Subterrânea*, vol. 21, n. 1, p. 123-137.2007.

RAMOS, M.L.S.; PAIXÃO, M.M.O.M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas - Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos.** Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), 2003.

RIMANN, E.T. 1917. **A kimberlita no Brasil.** *Anais da Escola de Minas*, Ouro Preto, 15:27-32.

ZOBY, J. L. G.; MATOS, B. A.; CONEJO, J. G. (2004) **Disponibilidade de Águas Subterrâneas na Bacia do Rio São Francisco.** São Paulo, Brasil: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 21pp.

## CAPÍTULO 2

### DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 2.1 Contexto Geológico

A área de estudo está inserida na porção centro-sul da Bacia intracratônica do São Francisco (figura 2), sendo constituída essencialmente por rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, pertencente ao Supergrupo São Francisco.

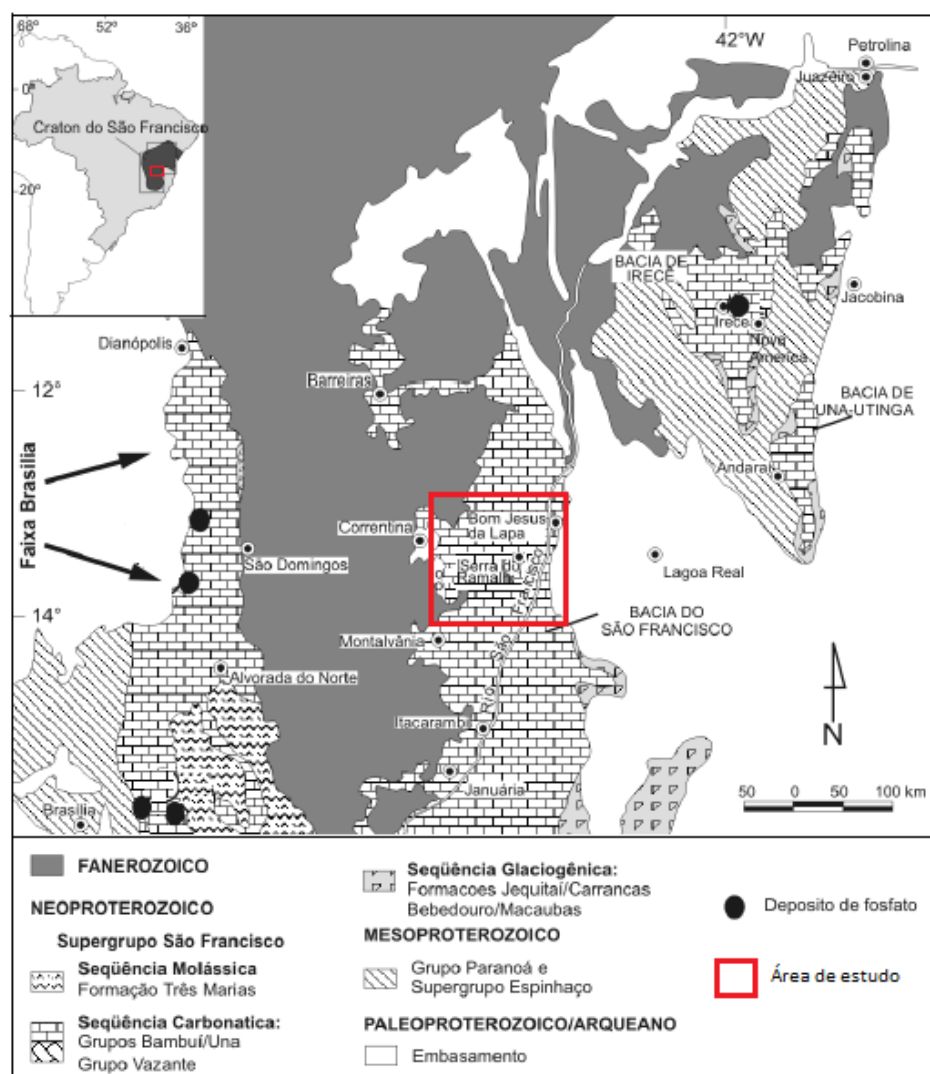


Figura 2: Mapa geológico regional simplificado. Modificado de Misi *et al.*, 2007.

Figure 2: Simplified regional geological map. Modified from Misi *et al.*, 2007.

O embasamento da bacia do São Francisco é composto por rochas gnaiss-migmatíticas arqueanas, intrudidas por granitóides e sienitos paleoproterozóicos (Conceição Filho *et al.*, 2003), a exemplo do Complexo Granítico Migmatítico Correntina e rochas granitóides da Suíte Intrusiva Correntina (Souza *et al.*, 2004), assim como o Batólito de Guanambi, que juntos formam o bloco Guanambi-Correntina (Rosa *et al.*, 1996) expressando a maior parte do substrato cristalino na área de trabalho. A sedimentação da bacia é compreendida pelas rochas do Supergrupo Espinhaço de idade mesoproterozóica, Supergrupo São Francisco de idade neoproterozóica, Grupo Santa Fé do Paleozóico e por fim os Grupos Areado, Mata da Corda e Urucua do Cretáceo (Alkmim & Martins-Neto *et al.*, 2001).

As rochas do Supergrupo São Francisco, alvo desta pesquisa, originaram-se a partir de eventos extensionais ocorridos entre 900 e 600 Ma, durante a fragmentação do Supercontinente Rodínia (Condie, 2002), com sedimentação dividida em três megasequências: glaciogênica, carbonática (plataforma carbonática) e siliciclástica, separadas por discordâncias de primeira ordem (Misi *et al.*, 2007). Na área de estudo as rochas do Supergrupo São Francisco são representadas pelas unidades do Grupo Bambuí. O Grupo Bambuí foi depositado numa bacia de antepaís com depocentro na direção NS, paralelo à Faixa Brasília, formada pela colagem do Gondwana Ocidental durante o Neoproterozoico, numa plataforma do tipo rampa (Chang *et al.*, 1988; Dardenne, 1978; Martins-Neto; Alkmim, 2001; Rodrigues, 2008). A divisão litoestratigráfica vigente para o Grupo Bambuí nesta pesquisa, baseia-se nos trabalhos pioneiros de Costa & Branco (1961) e Dardenne (1978), que consideram, da base para o topo, as formações Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. A estratigrafia do Grupo Bambuí (figura 3) na área de pesquisa é composta por todas as unidades, com exceção da



Formação Três Marias (Conceição Filho *et al.*, 2003; Misi *et al.*, 2007; Reis, 2013; Gonçalves, 2014).

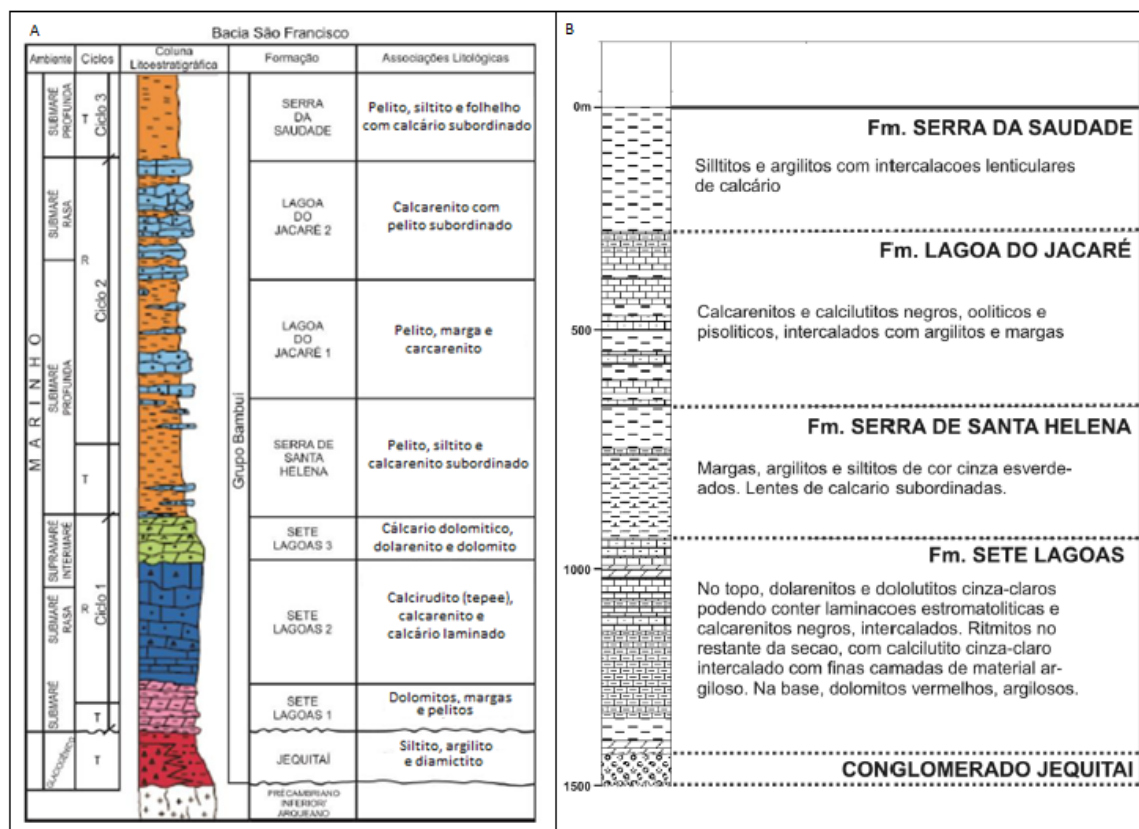


Figura 3: Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí. (A - Modificado de Conceição Filho *et al.*, 2001; B - Misi *et al.*, 2007).

Figure 3: Stratigraphic column of the Bambuí Group. (A - Modified from Conceição Filho *et al.*, 2001; B - Misi *et al.*, 2007).

A sequência basal do Supergrupo São Francisco é representada pela formação Jequitaí, do Grupo Bambuí, constituída essencialmente por conglomerados, pelitos, quartzito e diamictitos glacio-marinhos, (Dardenne, 1978; Conceição Filho *et al.*, 2001; Misi *et al.*, 2007; Sanches, 2012; e Gonçalves, 2014), segundo Reis, 2013, a formação Jequitaí se apresenta de forma restrita na região de estudo, ocorrendo em uma área de distribuição insignificante regionalmente, a oeste do município de Santa Maria da Vitória e também nas proximidades da cidade de Jaborandi, sem representação no mapa geológico da área de estudo (figura 4). No topo da formação Jequitaí,

depositaram-se em contato discordante litofácies siliciclásticas e carbonáticas da plataforma carbonática do Grupo Bambuí (SANCHES, 2012).

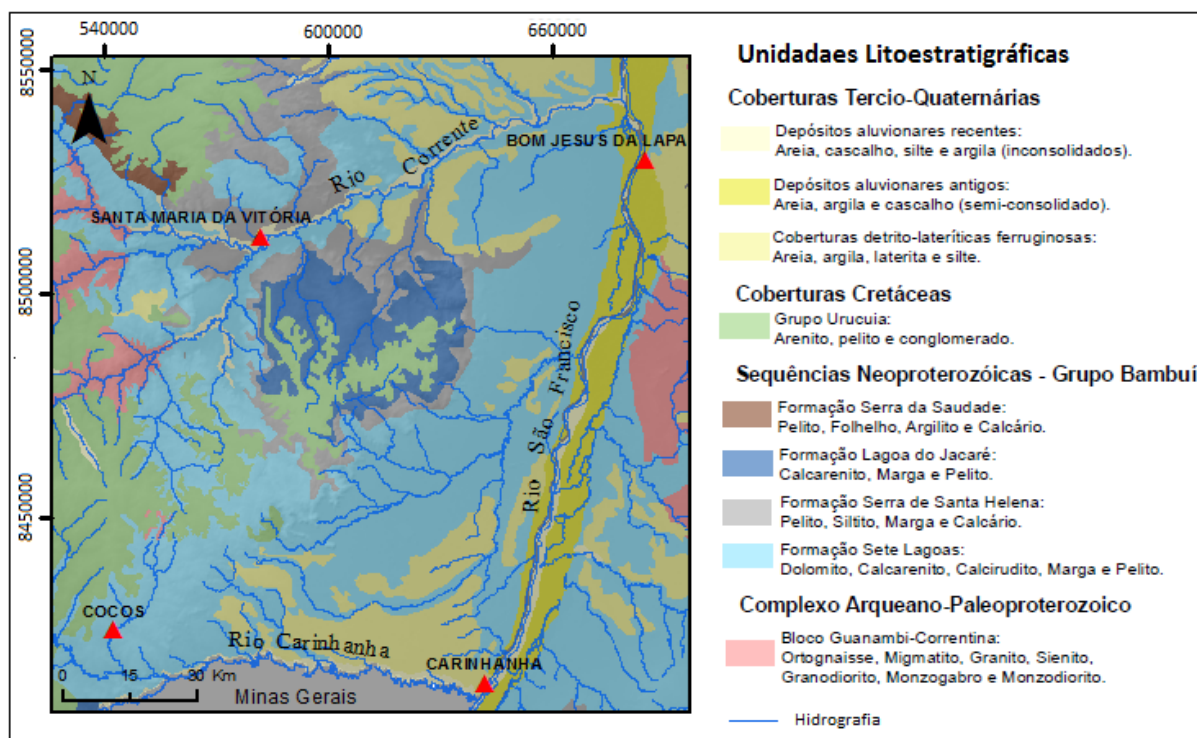


Figura 4: Mapa Geológico da Área de Trabalho.  
Figure 4: Geological Map of the Work Area.

De acordo com Martin, 2011 e Conceição Filho *et al.*, (2003) a megasequência carbonática, é dividida da base para o topo, nas seguintes unidades e respectivas litofácies característica: Formação Sete Lagoas, subdividida em Fm. Sete Lagoas 1 ou Membro Inferior, composta por dolomitos margosos e pelitos (início da plataforma carbonática); Fm. Sete Lagoas 2 ou Membro Médio, constituído por calcários laminados, calciruditos (*tepee*) e calcarenitos; Fm. Sete Lagoas 3 ou Membro Superior, essencialmente dolomítica, compreendido por calcários dolomíticos, dolarenitos e dolomitos com formas variadas de estromatólitos; Formação Serra de Santa Helena constituída por pelítos, siltitos, margase intercalações de calcários subordinados; Formação Lagoa do Jacaré, subdividida em Fm. Lagoa do Jacaré 1, na base, composta por uma associação de pelitos com margas e calcarenitos geralmente

oolíticos, com estratificação cruzada de correntes; Fm. Lagoa do Jacaré 2, no topo da formação, com as litofácies calcarenitos tornando-se dominantes e as pelíticas subordinadas; Fm. Serra da Saudade compreendida por siltitos (pelitos verdes), folhelhos e argilitos com esparsas intercalações de calcário.

A espessura das coberturas carbonáticas neoproterozóicas da Bacia do São Francisco é variável, muito provável devido a um sistema de falhas do embasamento reativado durante a sedimentação (Misi *et al.*, 2007). A espessura do estrato sedimentares do Grupo Bambuí na região de Sete Lagoas, em Minas Gerais é de 600 metros (Pedrosa Soares *et al.*, 1994). Já na região dos municípios de Serra do Ramalho e Santa Maria da Vitória, ambas na Bahia (inseridas na área de estudo), a estratigrafia do Grupo Bambuí representa uma seção com aproximadamente 400 e 350 metros de espessura respectivamente, desde a base da Formação Sete Lagoas até o topo da Formação Lagoa do Jacaré (Dardenne, 1978; Misi, 1979; Misi *et al.*, 2007; Reis, 2013).

## **2.2 Aspectos Fisiográficos**

Os aspectos fisiográficos analisados nessa pesquisa são referentes as condições climáticas, balanço hídrico e relevo. O clima característico da área de estudo varia do semiárido a semiúmido (IBGE, 2012), predominando o semiárido, com temperaturas mínima, máxima e média anual de 19,1°C, 32°C e 24,9°C respectivamente, podendo alcançar mais ou menos 40°C nos dias mais quentes e aproximadamente 10°C nas madrugadas mais frias para cidade de Bom Jesus da Lapa (INMET, 2018). Temperaturas típicas de climas continentais com período de seca bem definido entre os meses de maio e outubro (figura 5), coincidindo principalmente com a estação de inverno, e a temporada de chuvas entre os meses de novembro e abril (INMET, 2018). As amostragens de campo foram realizadas no

mês de maio, que marca o começo do período de estiagem. A precipitação média anual varia de aproximadamente 700 mm na planície do São Francisco a 900 mm em direção às áreas mais elevadas a oeste.

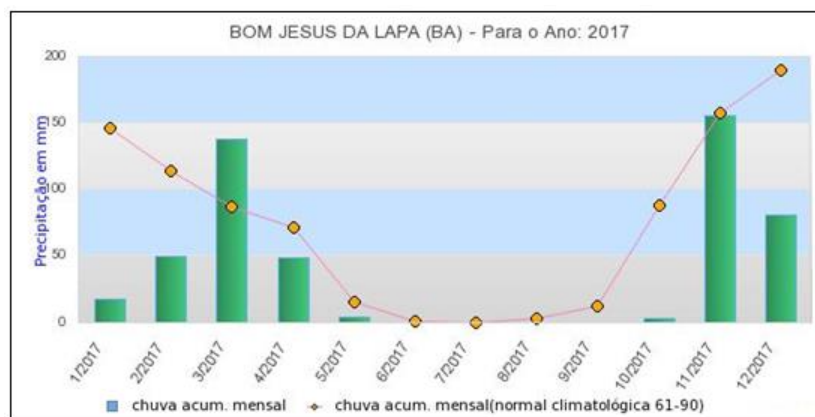


Figura 5: Precipitação média do ano de 2017 e média de precipitação acumulada entre os anos de 1961 e 1990 na cidade de Bom Jesus da Lapa (INMET, 2018).

*Figure 5: Average precipitation of the year 2017 and average accumulated precipitation between the years of 1961 and 1990 in the city of Bom Jesus da Lapa (INMET, 2018).*

O balanço hídrico, realizado nas cidades de Bom Jesus da Lapa e Carinhanha (figura 6), revela que a região vem sofrendo uma crise hídrica superficial, com retirada e déficit hídrico entre os meses de fevereiro e outubro/novembro, e com reposição e excedente hídrico apenas nos meses de novembro/dezembro e janeiro (INMET, 2018).

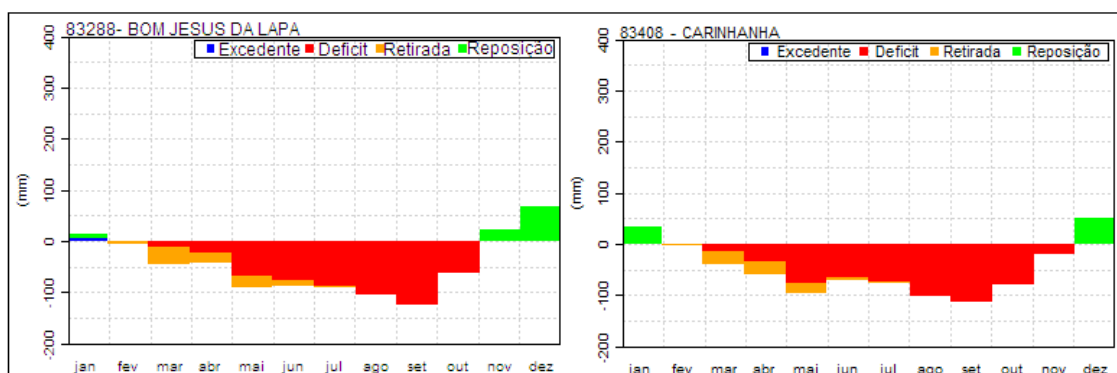


Figura 6: Balanço hídrico para as cidades de Bom Jesus da Lapa e Carinhanha entre os anos de 1961 e 1990 (INMET, 2018).

*Figure 6: Water balance for the cities of Bom Jesus da Lapa and Carinhanha between the years of 1961 and 1990 (INMET, 2018).*

A geomorfologia da região de estudo varia de oeste para leste. Na porção ocidental da área predomina o relevo tabular com feições de dissecção característico das camadas arenosas do Grupo Urucuia, apresentando as maiores cotas altimétricas da região. Na porção central e ocidental, o relevo é levemente ondulado, cortado por vales de formas topográficas suaves, tendendo a planificação à medida que se aproxima do vale do São Francisco (Andrade & CASCAES, 1990), atuantes sobre as rochas calcárias e pelíticas do Grupo Bambuí. A Serra do Ramalho representa a principal feição geomorfológica da porção central da área de estudo, mostrando importante alinhamento das cristas de rochas carbonáticas, a qual é orientada na direção SW-NE, e morfologicamente possuindo topo aplainados e flancos escarpados, com estruturas de dissolução, como as feições erosivas ruiformes ou *lápias*, que são sustentadas pelas litofácies de calcários calcíticos da Formação Sete Lagoas (Martins, 2001), características de ambiente epicarstico, muito comum em toda região (figura 7).



Figura 7: Relevo ruiforme e formas em *lápias* nos calcários do Grupo Bambuí na região do município de Santa Maria da Vitória. Fonte: Pesquisa de campo.

*Figure 7: Ruiform terrain and lapies forms in Bambuí Group limestones in Santa Maria da Vitória region. Source: Field survey..*

### 2.3 Hidrogeologia

Os sistemas aquíferos correspondem a unidades geológicas com comportamento hidrogeológico semelhante entre si (Zobby *et al.*, 2004). A área de



estudo está inserida no contexto hidrogeológico da bacia hidrográfica do São Francisco (figura 8), sendo constituída essencialmente pelo sistema aquífero Bambuí, de natureza fraturada-cárstica, compreendido pela ocorrência de rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas pertencentes ao Grupos Bambuí. A área ainda contém pequenas porções do sistema aquífero Cristalino Sul, de natureza fissural, localizado estratigraficamente abaixo do sistema aquífero Bambuí, e dos sistemas aquíferos Urucuaia e Coberturas Cenozóicas, de natureza porosa, situados respectivamente sobre o sistema aquífero Bambuí. Segundo Andrade e Cascaes (1990); os aquíferos granulares, sobrejacentes, por possuírem enorme capacidade de infiltração, transferem parcela da água meteórica para o Aquífero Bambuí através da recarga alogênica.

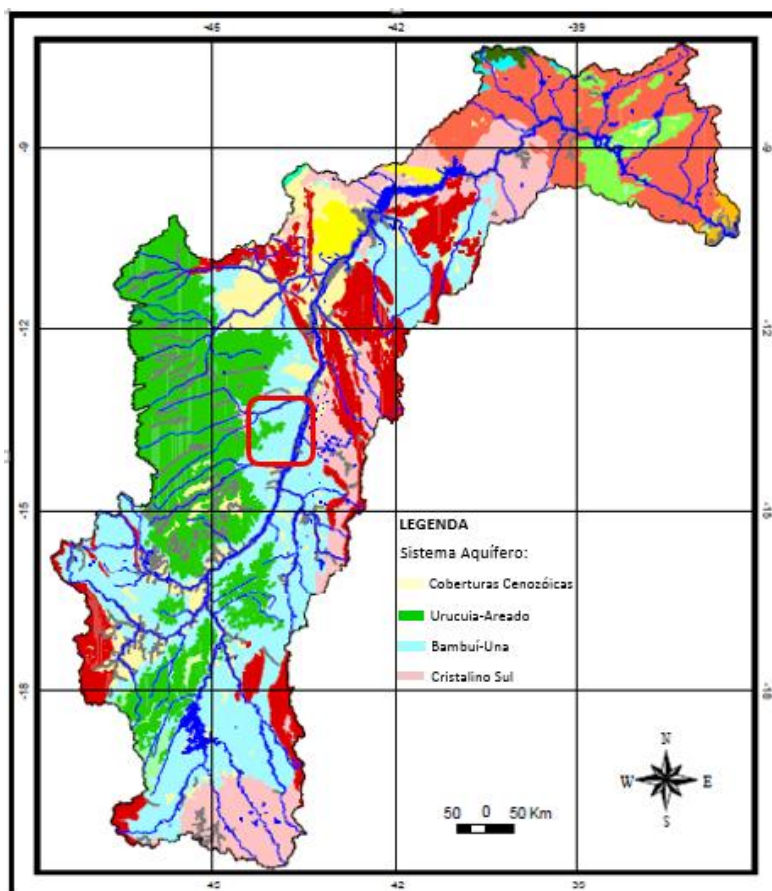


Figura 8: Mapa Hidrogeológico da bacia hidrográfica do rio São Francisco (modificado de Zobby *et al.*, 2004).

Figure 8: Hydrogeological map of the São Francisco river basin (modified from Zobby *et al.*, 2004).

O sistema Aquífero Bambuí é livre, anisotrópico, heterogêneo e com espessura variando em toda bacia (Andrade e Cascaes, 1990). Os vazios no aquífero estão relacionados com fatores endógenos e exógenos, tais como a composição litológica, sistemas de fraturas e falhas regionais, além do acamamento, clima, formas de relevo e feições cársticas. A carstificação decorre da dissolução das rochas carbonáticas/fissuradas preenchidas pela água com caráter levemente ácido, sendo relacionada principalmente a ação do ácido carbônico e/ou do ácido sulfúrico (Han e Lui, 2004).

Devido a sua variação litológica, o Sistema Aquífero Bambuí é dividido nas unidades hidrogeológicas, cárstica e pelito-carbonática (Gonçalves, 2014). Na área de estudo predomina a unidade aquífera cárstica (figura 9), representada pelo Aquífero Cárstico Bambuí (ACB), sendo formada basicamente pelos litótipos carbonáticos presentes na Formação Sete Lagoas e na Formação Lagoa do Jacaré.

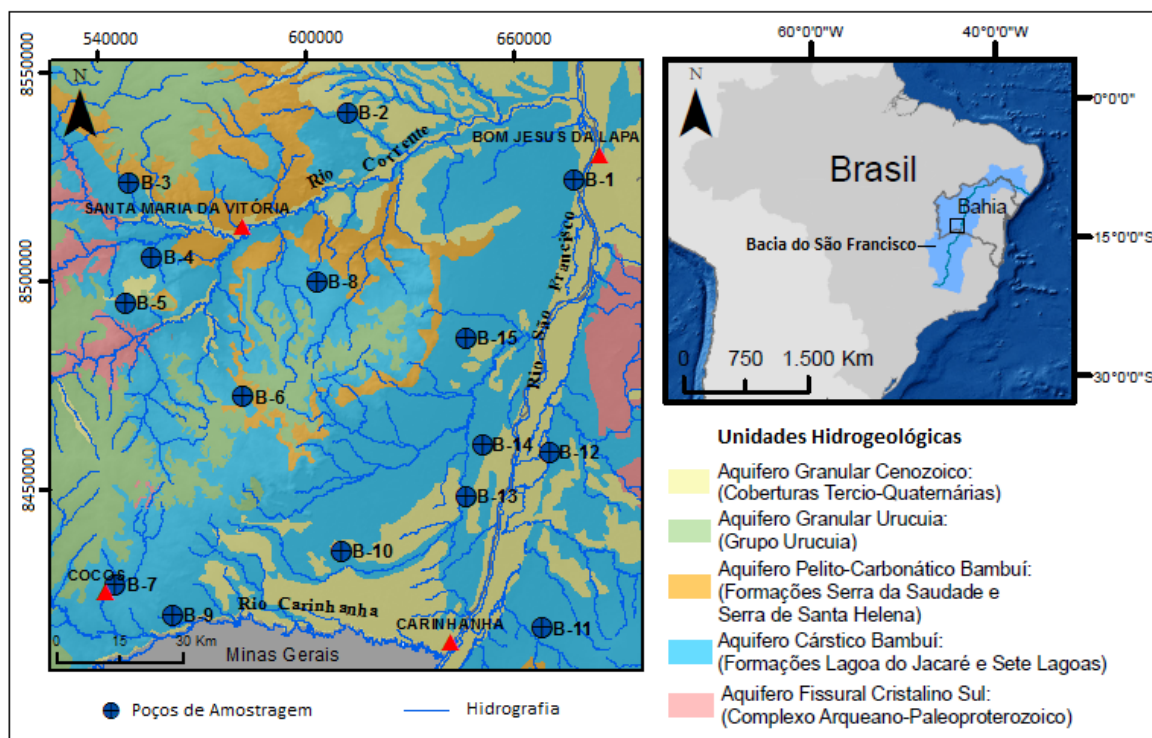


Figura 9: Mapa Hidrogeológico da área de estudo e localização dos poços de amostragem (Adaptado da base SIG da CPRM, 2016).

Figure 9: Hydrogeological map of the study area and location of the sampling wells (Adapted from CPRM SIG base, 2016).

O ACB apresenta vazões entre 10 e 25 m<sup>3</sup>/h e uma produtividade considerada baixa, embora localmente possa ser moderada (Gonçalves, 2014). Subordinado a unidade cárstica, ocorre a unidade pelito-carbonática, que corresponde as rochas da Formação Serra da Saudade e os litotípos da Formação Serra de Santa Helena. A alternância entre litofácies pelíticas e carbonáticas na estratigrafia do Grupo Bambuí condiciona parcialmente a recarga, armazenamento, circulação e a carstificação neste meio. Na zona superior ou de aeração (epicarste), pode ocorrer aquíferos suspensos associados a aquícludes. Estas unidades aquíferas foram caracterizadas de acordo com o mapeamento geológico, na escala 1:1000.000, disponível na base SIG do SIAGAS/CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), assim como o mapeamento geológico realizada por Reis, 2013 na região do município de Santa Maria da Vitória e pelo mapeamento hidrogeológico de Gonçalves, 2014 na região do município de Serra do Ramalho.

Nesta região da bacia hidrográfica do rio São Francisco ocorrem importantes rios e riachos que abastecem o rio São Francisco como o rio Corrente, localizado entre as cidades de Santa Maria da Vitória e São Felix do Coribe, Rio Carinhanha que representa uma das fronteiras dos estados da Bahia e Minas Gerais e o perene Riacho do Ramalho. As nascentes desses rios estão situadas na porção oeste do estado e representam surgências de águas subterrâneas do aquífero Urucuia, sendo uma das fontes de recarga do ACB. O mapa potenciométrico da área de estudo (figura 10), confeccionado através de informações contidos nas fichas de poços tubulares do SIAGAS/CERB sobre o nível estático e cota altimétrica, demonstra que o fluxo regional das águas subterrânea converge para o Rio São Francisco, que representa



o nível de base regional, demonstrando que a recarga do Rio São Francisco ocorre também pelas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bambuí.

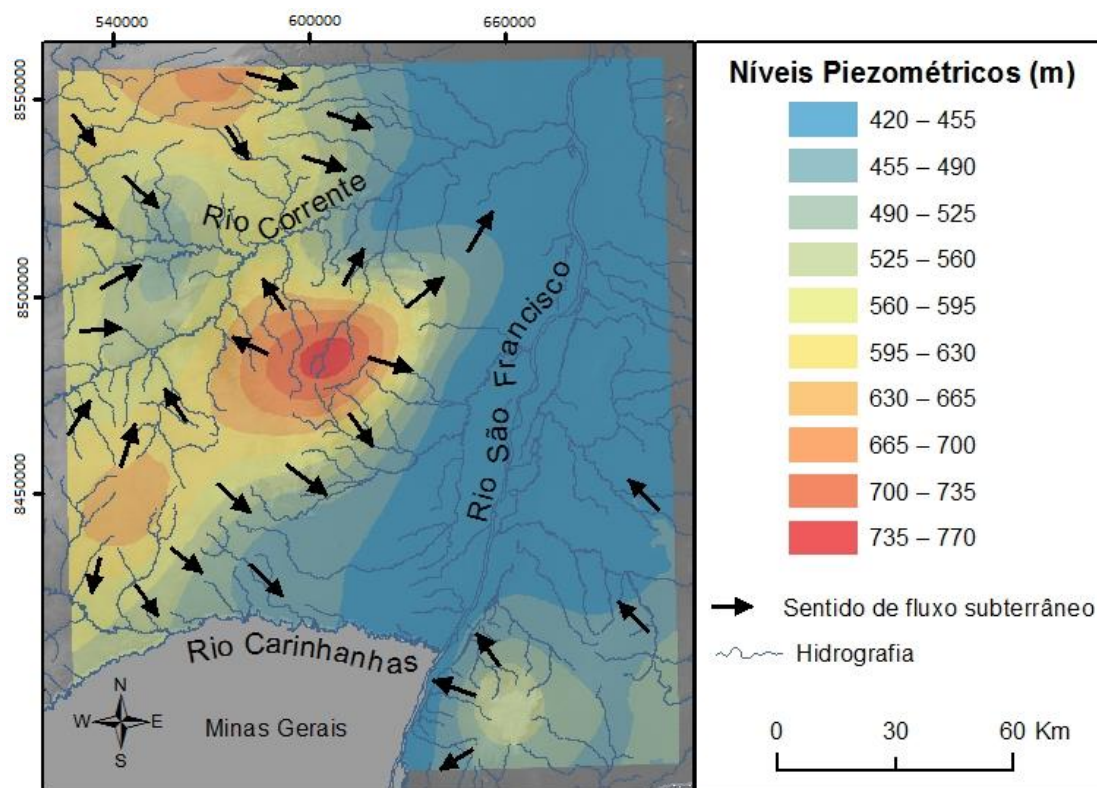


Figura 10: Mapa potenciométrico da área de estudo.  
 Figure 10: Potentiometric map of the study area.

## REFERÊNCIAS

Alkmim F. 2004. **O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimita-lo.** In: Mantesso-Neto et al. (eds) Geologia do Continente SulAmericano. Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Becca, pp.: 17-35.

ALKMIM F.F.; MARTINS NETO M.A. **A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos.** In C.P. Pinto, M.A. Martins Neto (eds). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. SBG MG, Belo Horizonte, 2001. p. 9-30.

ANDRADE, J. B. M.; CASCAES, O. S. F. **Panorama hidrogeológico do Grupo Bambuí no Oeste da Bahia.** In: 6º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas-ABAS, Porto Alegre, 1990. Anais... Porto Alegre, 1990. p.50-57.

BARBOSA, J.S.F.; DOMINGUEZ, J.M.L. **Geologia da Bahia: texto explicativo para o mapeamento geológico ao milionésimo.** Salvador: SGM, 1996.

CHANG, H.H. et al. **Considerações sobre a evolução tectônica da Bacia do São Francisco**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. Anais..., Belém: SBG, 1988. v.5, p.2076-2090.

CONCEIÇÃO FILHO, V.M.; MONTEIRO, M.D.; RANGEL P.A.; GARRIDO, I.A.A. **Bacia do São Francisco entre Santa Maria da Vitória e Iuiú, Bahia: geologia e potencialidade econômica** / Valter Mônico Conceição Filho et al. – Salvador: CBPM, 2003. 76p.:il., mapa. – (Série Arquivos Abertos, 18).

CONDIE, K. C. **The supercontinent cycle: are there two patterns of Cyclicity?** Journal of African Earth Sciences, v. 35, n.2, p. 179 - 183, 2002.

COSTA, M.T.; BRANCO, J.J.R. **Roteiro Geológico Belo Horizonte-Brasília**. Publ. Instituto de Pesquisas Radioativas. Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, n.15, p. 9-25, 1961.

DARDENNE, M. A. **Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Recife, 1978. v. 2, p. 597-610, 1978.

GONÇALVES, MANUEL VITOR PORTUGAL. **Flúor nas águas subterrâneas do Aquífero Bambuí no Sudoeste da Bahia (Brasil)** / Manuel Vitor Portugal Gonçalves. – Salvador, 2014. 193 f.: Color.

HAN G, LUI CQ (2004) **Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province. China Chem Geol** 204:1–21.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **IBGE Cidades@**. Acessível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?>. Disponível em: 02.02.2012.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia: Normais Climatológicas**. Brasília. 2018. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/html/observacoes.php](http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php)>. Acesso em: 02 fev. 2018.

MARTINS, V.S. **Estudo de inclusões fluidas e de isótopos de estrôncio dos depósitos de fluorita da Serra do Ramalho (Bahia) e Montalvânia (Minas Gerais)**. 2001. 89f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

MARTINS-NETO, M.A.; PEDROSA-SOARES, A.C.; LIMA, S.A.A. **Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco Craton and Araçuaí Fold Belt, eastern Brazil**. Sedimentary Geology, 2001. 141-142:343-370.

MISI, A. **O Grupo Bambuí no estado da Bahia**. In: INDA, H. A. V. (Ed.). Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: Textos básicos. Salvador: CPM, v. 1., p. 119-154, 1979.

MISI A. *et al.* **Chemostratigraphic Correlation of Neoproterozoic successions in South America.** *Chemical Geology*, v. 237, p. 161-185, 2007.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* **Nota explicativa dos mapas geológico, metalogenético e de ocorrências minerais do Estado de Minas Gerais. Escala 1: 1.000.000.** Belo Horizonte, COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais, 1994.

REIS, CAROLINA. **Geologia, Sistemas Depositionais e Estratigrafia Isotópica do Grupo Bambuí na Região de Santa Maria da Vitória, BA / Carolina Reis.** -- Brasília, 2013. 97 f. Il., color. ; 1 mapa em anexo.

RODRIGUES, J. B. **Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí: um estudo de zircões detríticos e idades modelos Sm-Nd.** 2008. 141f. Tese(Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

ROSA, M.L.S. *et al.* **Magmatismo potássico-ultrapotássico pos a tardi orogênico (associado a subducção) no oeste da Bahia: Batólito Monzo-Sienítico de Guanambi-Urandi e os Sienitos de Correntina.** *Geochimica Brasiliensis*, v.10, n.1, p.27-042, 1996.

SANCHES, A. L. **Fosforitos Neoproterozóicos dos Grupos Vazante (MG) e Una (BA): Origem, idades e correlações.** Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Salvador, 2012. 158 p.

SOUZA, J.D. *et al.* **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: sistema de informações geográficas - SIG. Folha SD.23 Brasília.** Brasília: CPRM, 2004. 1 CD-ROM. Programa Geologia do Brasil - PLGB.

ZOBY, J. L. G.; MATOS, B. A.; CONEJO, J. G. (2004) **Disponibilidade de Águas Subterrâneas na Bacia do Rio São Francisco.** São Paulo, Brasil: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 21pp.

**CAPÍTULO 3****ARTIGO 1 – HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUÍFERO BAMBUÍ (BAHIA, BRASIL)**

---

**RESUMO**

As águas subterrâneas do Aquífero Bambuí, de natureza cárstica e fraturada, localizado na região sudoeste da Bahia, tem sido cada vez mais utilizada no abastecimento populacional, muito em função da crescente escassez das águas superficiais, decorrente de grandes períodos de estiagem. O conhecimento da composição química, físico-química e isotópica das águas subterrâneas contribui para que ocorra uma gestão adequada desse importante bem natural. Para realizar essa pesquisa, foram coletadas 15 amostras de águas subterrâneas, para análises químicas, físico-químicas e isotópicas, em poços tubulares contidos em rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí de idade neoproterozóica. Os resultados analíticos permitiram realizar a classificação hidrogeoquímica quanto à presença de íons maiores dissolvidos nas águas, além de análise estatística para o entendimento do processo de salinização. A qualidade dessas águas foi definida a partir dos padrões de potabilidade, de acordo com os parâmetros químicos e físico-químicos indicados pela legislação nacional e internacional de saúde e meio ambiente. Para determinar as assinaturas isotópicas, foram utilizados os isótopos estáveis deutério e oxigênio 18 ( $\delta^2\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ), sugerindo assim a dinâmica de recarga destas águas.

Palavras-Chave: Águas Subterrâneas, Aquífero Bambuí.

**ABSTRACT**

The groundwater of Bambuí Aquifer, of karstic and fractured nature, located in the southwestern region of Bahia state, has been increasingly used in the population supply, due to the rising scarcity of surface waters as a result of great drought periods. The knowledge of chemical, physical-chemical and isotopic composition of groundwater contributes to the proper management of this important natural resource. To achieve this research, there were collected 15 groundwater samples in tubular wells contained in neoproterozoic carbonate and pelitic-carbonate rocks of Bambuí Group, for chemical, physicochemical, and isotopic analyzes. The analytical results allowed the hydrogeological control on the presence of larger ions dissolved in the waters, as well as statistical analysis for the understanding of salinization process. The quality of these waters was defined based on adequacy assessments for use, as regards potability standards, according to the chemical and physical-chemical parameters indicated by national and international health and environmental legislation. To determine the isotopic signatures, the stable isotopes deuterium and oxygen 18 ( $\delta^2\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ) were used, thus suggesting the dynamics of recharge of these waters.

Keywords: Groundwater; Bambuí Aquifer.

## 1. Introdução

Quando explorada de forma sustentável e segura, as águas subterrâneas proporcionam uma importante alternativa de fonte hídrica para o abastecimento comunitário, principalmente em regiões com recorrentes e longos períodos de baixa precipitação. A presente pesquisa apresenta uma série de estudos, sobre a hidrogeoquímica e isótopos estáveis - hidrogênio 2 (deutério) e oxigênio 18 ( $\delta^2D/\delta^{18}O$ ) - das águas subterrâneas do sistema aquífero Bambuí, na região sudoeste do estado da Bahia (figura 11). Esse sistema aquífero é composto essencialmente por rochas sedimentares carbonáticas e pelito-carbonáticas, que constituem a unidade geológica Grupo Bambuí (Rimann 1917).

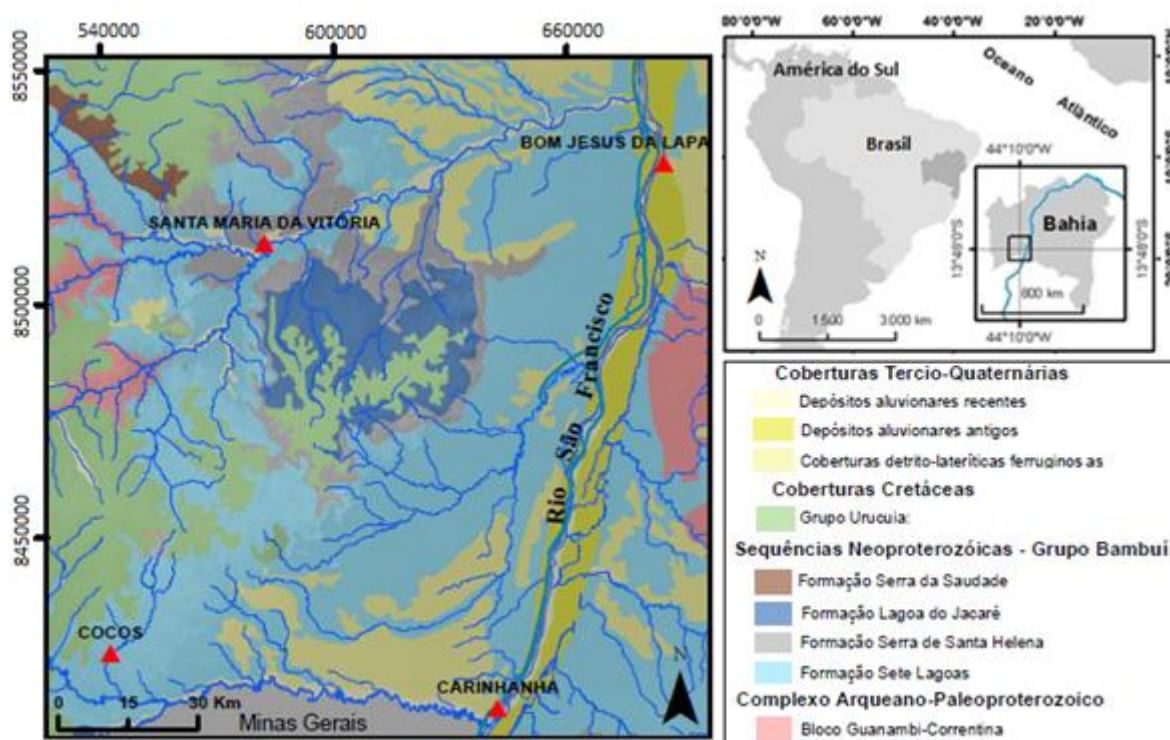


Figura 11: Mapa Geológico e de Localização da Área de Estudo.  
 Figure 11: Geological and Location Map of the Study Area.

O sistema aquífero Bambuí é morfologicamente heterogêneo com alta variação hidrogeológica e hídrica. Essa variação é ocasionada devido à natureza cárstica e fraturada de suas rochas, resultando em regiões com diferentes graus ou níveis de

carstificação e fraturamento. Na região sudoeste da Bahia, a maior parte do sistema aquífero Bambuí apresenta um elevado grau de carstificação em virtude do grande volume de rochas carbonáticas presentes nas formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré (Zobby *et al.*, 2004; Gonçalves, 2014).

Em relação a classificação hidroquímica, salinidade e qualidade, estudos anteriores demonstram que as águas do sistema aquífero Bambuí são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e/ou magnesianas, com predomínio dos tipos cálcicos. Apresenta caráter levemente alcalino, com significativo teor de sólidos totais dissolvidos (STD), refletindo a interação da água com a rocha calcária (Ramos e Paixão, 2003). Segundo Oliveira *et al.*, 2007 estas águas não são indicadas para o consumo humano devido à alta concentração de carbonato de cálcio e magnésios, porém podem ser utilizadas para atividades agropecuárias e em trabalhos domésticos.

As investigações convencionais são, muitas vezes, insuficientes para compreensão da evolução das águas subterrâneas. Esse conhecimento complementar pode ser obtido usando o auxílio dos métodos de investigação isotópica. Os isótopos estáveis da molécula da água, ou dissolvidos nesta, variam previsivelmente no ciclo hidrológico (Clark; Fritz *et al.*, 1997). Publicações sobre isótopos estáveis na região de pesquisa, revelam uma contribuição da recarga pelas águas das chuvas locais, com baixa evaporação e rápida infiltração (Camurugy, 2009, Gonçalves, 2014).

Este trabalho tem por objetivo compreender a classificação, salinização, qualidade e dinâmica de recarga das águas subterrâneas do Aquífero Bambuí, através dos aspectos químicos, físico-químicos e isotópicos. Esta pesquisa apresenta relevância científica e socioambiental para gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

## 2. Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo está inserida no contexto geotectônico da Bacia intracratônica do São Francisco, sendo constituída essencialmente por litotípos carbonáticos e pelito-carbonáticos do Grupo Bambuí de idade neoproterozóica, pertencente ao Supergrupo São Francisco.

Na região, o Grupo Bambuí está estratigraficamente (figura 11) depositado sobre o embasamento Arqueano-Paleoproterozoio do Cráton São Francisco e parcialmente coberto pelos arenitos cretáceo do Grupo Urucuaia e pelos sedimentos terció-quaternários. A divisão litoestratigráfica do Grupo Bambuí nesta pesquisa, baseia-se no trabalho de Dardenne (1978) e Misi *et al.*, 2007. A espessura da plataforma carbonáticas na região dos municípios de Serra do Ramalho e Santa Maria da Vitória, representa uma seção com cerca de aproximadamente 400 e 350 metros respectivamente (Misi *et al.*, 2007; Reis, 2013).

O clima predominante na região varia do semiárido a semiúmido (IBGE, 2012), com período de seca bem definido entre os meses de maio e outubro e temporada de chuvas entre os meses de novembro e abril. A geomorfologia varia de oeste para leste. Na porção ocidental, predomina o relevo tabular característico das camadas arenosas do Grupo Urucuaia, apresentando as maiores cotas altimétricas da região (aproximadamente 830 m). Na porção central e ocidental, o relevo é levemente ondulado, tendendo a planificação à medida que se aproxima do vale do São Francisco (Andrade & Cascaes, 1990). A Serra do Ramalho, na porção central da área de estudo, representa a principal feição geomorfológica da região.

Em relação a hidrogeologia, a área de estudo, encontra-se inserida na bacia hidrográfica do São Francisco, sendo constituída essencialmente pelo sistema aquífero Bambuí (Zobby *et al.*, 2004). Devido a sua variação litológica e o



posicionamento estrutural, o sistema aquífero Bambuí é dividido nas unidades hidrogeológicas cárstica e pelito-carbonática (Gonçalves, 2014). Na área pesquisada predomina a unidade aquífera cárstica, formada pelos litotipos carbonáticos das Formações Sete Lagoas e Formação Lagoa do Jacaré. Subordinada e por vezes intercalada à unidade cárstica, ocorre a unidade pelito-carbonática, compreendida basicamente pela ocorrência das rochas pelíticas, de natureza fraturada, das formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena. Devido a essa alternância litológica do Grupo Bambuí, podem ocorrer aquíferos suspensos associados a aquícludes na zona superior do sistema aquífero. Nesta porção da bacia hidrográfica do São Francisco ocorrem importantes rios e riachos que abastecem o curso principal como o Rio Corrente e o Rio Carinhanha. As nascentes desses rios, localizadas na porção oeste do polígono em estudo, representam surgências de águas subterrâneas do aquífero Urucuaia, sendo uma das fontes de recarga do aquífero Bambuí, em decorrência do seu posicionamento litoestrutural.

### **3. Materiais e Métodos**

As unidades geológicas e aquíferas foram divididas de acordo com o mapeamento geológico, na escala 1:1000.000, disponível na base SIG (sistema de informação geográfica) da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) assim como o mapeamento geológico, na escala 1:30.000, realizado por Reis, 2013 na região do município de Santa Maria da Vitória e pelo mapeamento hidrogeológico, na escala 1:1000.000, de Gonçalves, 2014 na região de Serra do Ramalho. O mapa potenciométrico da área de estudo, foi confeccionado através de informações contidas nas fichas de poços tubulares do SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas) /CERB (Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia), sobre o nível estático e cota altimétrica.



Neste levantamento foram coletadas 15 amostras para análise química e isotópica, de águas subterrâneas em poços tubulares, durante 5 dias no mês de maio de 2017. Durante a coleta das amostras, foram medidos *in situ* os parâmetros físico-químicos temperatura, condutividade elétrica (CE), pH e STD utilizando o medidor multiparâmetros Multi water Quality Checker U-50 Series, fabricado pela HORIBA. As alíquotas foram armazenadas em recipientes de 0,5l (polietileno), para análises de cátions e ânions, e de 50 ml (âmbar), destinados as análises isotópicas. As amostras foram coletadas em povoados e fazendas da região, que utilizam desta água para usos diversos. Os frascos fechados foram conservados sob refrigeração para posterior encaminhamento ao laboratório. As análises químicas foram realizadas no laboratório do Núcleo de Estudos Ambientais (NEA) do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (UFBA). A determinação dos cátions ( $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) e ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{F}^-$ ) foi realizada através de cromatografia iônica, enquanto a dos ânions ( $\text{HCO}_3^{2-} + \text{CO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ) foi obtida por titulação. Os resultados químicos foram tratados com uso dos softwares Qualigraf 2001 e Diagrammers 6.5. O tratamento estatístico foi realizado utilizando o Excel 2013 e a ferramenta Action 2.8. Para confecção dos mapas foi utilizado o Arcgis10.1®. Além disso, as águas foram avaliadas de acordo ao consumo humano e pecuário em conformidade com as normas ambientais e de saúde pública da Organização Mundial da Saúde (WHO) (2003) e Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Os valores dos isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  foram determinados no Laboratório de Física Nuclear Aplicada (LFNA) da UFBA. As análises foram realizadas usando o espectrômetro de massa. A incerteza média associada a estes resultados é de 0,1‰ para as medidas de  $^{18}\text{O}$  e de 1‰ para as determinações de  $^2\text{H}$ . O comportamento das análises isotópicas, foi abordado cartesianamente, permitindo

comparação com a linha meteórica global, e em mapa, permitindo visualizar a distribuição das concentrações ao longo da área.

## Resultados e Discussões

### 4.1 Classificação Hidroquímica

A água subterrânea, importante fonte hidrológica, pode conter íons dissolvidos em teores adversos à saúde (HIRATA, 2003). Os parâmetros químicos e físico-químicos, são afetados ou induzidos por atividades antrópicas, como práticas agrícolas, despejo de esgoto e lixo (Carreira *et al.*, 2014).

Os resultados das 15 amostras para os parâmetros químicos estão representados na Tabela 1. Em relação a classificação hidroquímica, o diagrama de Piper e a relação iônica característica (figura 12), indicam que na área de estudo predominam as águas do tipo bicarbonatadas cálcicas -  $\text{Ca}^{2+}(\text{HCO}_3^-)_2$  - em 67% de todos os poços estudados, ocorrendo também as bicarbonatadas magnesianas -  $\text{Mg}^{2+}(\text{HCO}_3^-)_2$  - em 20% e bicarbonatadas sódicas -  $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-$  - em 13% dos poços. A ordem relativa de concentração é dada por  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} >$  que todos os ânions para 100% das amostras, e  $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Mg}^{2+} >$  que todos os cátions para 87% das amostras. Esses valores refletem o predomínio da dissolução de rochas carbonáticas.

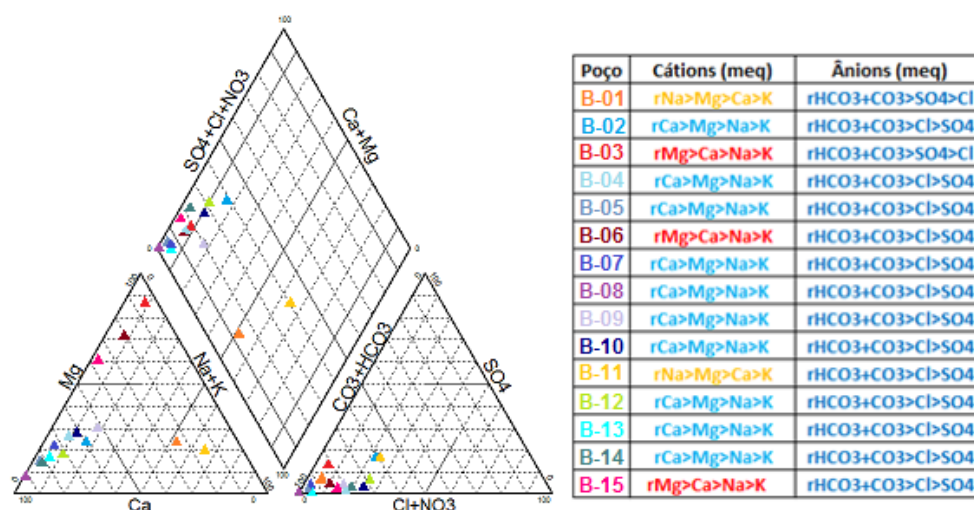


Figura 12: Diagrama de Piper e relação iônica característica das águas subterrâneas na área de estudo.  
Figure 12: Piper diagram and characteristic ionic relationship of groundwater in the study area.

Tabela 1: Resultados químicos e físico-químicos.  
 Table 1: Chemical and physicochemical results.

Amostras	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Alc (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	STD (mg/L)	CE (µS/cm)	pH	T° (C)
B-01	12.2	7.0	29.1	1	255.6	9.8	16.7	0.4	0.7	0.6	150.0	248.0	6.4	26.2°
B-02	46.5	11.1	14.2	1.2	330.1	65.3	70.5	6.2	0.5	*	664.0	725.0	6.7	27.6°
B-03	5.3	52.4	8.7	0.9	650.0	14.7	80.37	14.6	0.5	*	579.0	905.0	7.4	24.7°
B-04	37.2	8.9	5.2	0.7	456.4	45.7	3.9	20.9	*	*	477.0	746.0	7.4	27.6°
B-05	61.0	6.5	2.4	*	425.7	10.9	1.0	4.4	*	*	354.0	552.0	7.3	27.2°
B-06	24.9	52.0	9.3	1.3	631.1	34.7	26.2	16.9	0.9	*	594.0	927.0	7.3	24.9°
B-07	42.3	7.5	3.1	*	225.8	2.1	7.2	3.3	1.2	*	344.0	537.0	7.4	26.5°
B-08	102.1	5.1	0.9	*	174.0	*	0.9	*	*	13.2	547.0	856.0	7.2	25.1°
B-09	29.0	10.0	9.9	2.5	515.2	53.3	20.8	10.4	0.3	0.7	511.0	798.0	7.2	27.1°
B-10	29.7	7.9	5.7	*	466.9	57.5	13.3	55.9	*	*	496.0	775.0	7.3	29.3°
B-11	24.4	19.5	119.9	1.5	616.6	142.1	136.8	4.3	1.0	*	715.0	1120.0	7.7	28.8°
B-12	74.8	11.2	10.7	2.6	356.3	73.1	26.5	0.5	0.5	*	388.0	606.0	7.5	27.5°
B-13	21.3	2.8	1.8	*	77.9	1.6	1.3	*	0.3	*	184.0	282.0	7.9	29.1°
B-14	78.4	7.8	3.9	0.8	360.4	44.9	10.4	12.9	0.4	*	364.0	569.0	7.2	31.7°
B-15	20.1	20.4	1.8	*	384.0	27.0	8.3	17.2	0.4	*	477.0	745.0	7.4	28.9°
VCH	75.0	50.0	200.0	-	-	250.0	250.0	10.0	0.8	-	1000.0	-	6.0 - 9.5	-
VDA	-	-	-	-	-	-	1000.0	90.0	2.0	-	-	-	-	-
VIR	-	-	-	-	-	100.0	-	-	1.0	-	-	-	-	-

Observação: O limite de detecção mínimo (Ldm) para a alcalinidade foi 2 mg/L, e para os íons foi de 0,25 mg/L, \* corresponde a valores abaixo do Ldm. Valor máximo permitido para VCH - Consumo Humano, VDA – Dessedentação Animal, VIR – Irrigação, de acordo com WHO (2003) e CONAMA N°396/2008.

Note: The minimum detection limit (Ldm) for alkalinity was 2 mg / L, and for the ions was 0.25 mg / L, \* corresponds to values below the Ldm. Maximum allowed value for VCH - Human Consumption, VDA - Animal Quench, VIR - Irrigation, According to WHO (2003) and CONAMA N ° 396/2008.

O grande volume de águas bicarbonatadas cálcicas, em toda área de estudo (figura 13), evidencia a interação entre a água subterrânea e a rocha carbonática rica em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), comum em toda região; entretanto águas bicarbonatadas magnesianas indicam a influência de níveis de calcário dolomítico, descritos no membro superior da Formação Sete Lagoas (Martin, 2011), ocorrendo preferencialmente em áreas próximas ao contato entre as unidades aquífera cárstica e pelito-carbonática; e as águas bicarbonatadas sódicas sugerem a presença de águas meteóricas infiltradas no aquífero.

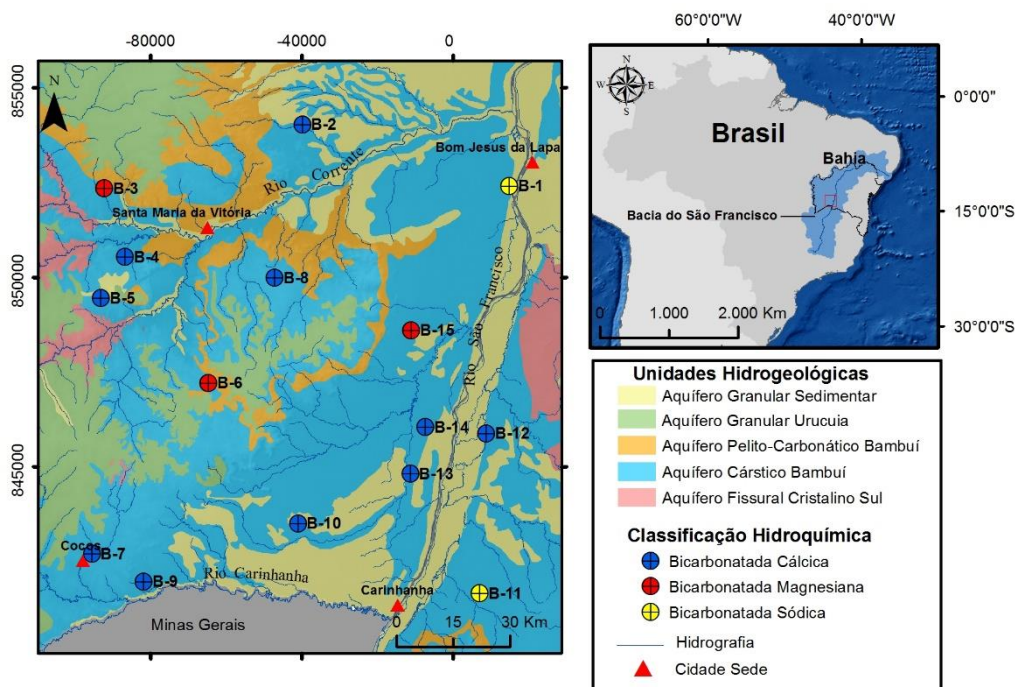


Figura 13: Mapa Hidrogeológico e tipo de águas subterrâneas da área de estudo.  
Figure 13: Hydrogeological map and groundwater type of the study area.

A amostra B-08 revela valores anômalos com relação ao fosfato ( $\text{PO}_4^-$ ), sugerindo uma possível fonte geogênica próxima ao ponto de amostragem.

### 3.1 Aspectos Físico-químicos

Os resultados amostrados para os parâmetros físico-químicos, também estão representados na Tabela 1. O pH das águas subterrâneas apresenta caráter neutro a levemente alcalino, com pH total variando entre 6.4 a 7.9 (sendo

87% das amostras com valores entre 7 e 7,9). A temperatura das águas oscilou entre 24,7° a 31,7°C, com predomínio das águas de maiores temperaturas nos poços localizados em áreas topograficamente mais rebaixadas, como no caso da planície do Rio São Francisco. A condutividade elétrica (CE) apresentou grande espectro de variação, com valores entre 248  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1120  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Em relação aos STD os resultados das análises demonstram alta variação, com valores entre 150 a 715 mg/L, sendo 60% das amostras do tipo doce (STD de 0 a 500 mg/L) e 40% do tipo salobra (500 a 1000 mg/L).

Para compreender quais os parâmetros que estariam mais associados à salinidade nessas águas subterrâneas, verificaram-se o nível de correlação entre a condutividade elétrica (CE) e os demais parâmetros analisados numa matriz de correlação de *Spearman* (tabela 2). Para tanto, utilizou-se dados dos poços cadastrados no banco de dados da CERB/SIAGAS e os dados obtidos no campo, totalizando 65 resultados analíticos. O resultado final revela que a CE apresenta moderadas correlações com os parâmetros alcalinidade ( $r_s= 0,52$ ), sulfato ( $r_s=0,65$ ) e cloreto ( $r_s=0,66$ ).

Tabela 2: Coeficiente de correlação de *Spearman*.

Table 2: *Spearman correlation coefficient*.

Matriz de Correlação	Ca	Na	K	Mg	Cl	F	Alc	SO4	NO3	SDT	CE
Ca	1,00										
Na	0,10	1,00									
K	0,18	0,74	1,00								
Mg	0,34	0,28	0,27	1,00							
Cl	0,09	0,50	0,39	0,29	1,00						
F	-0,14	0,33	0,26	0,05	-0,03	1,00					
Alc	-0,16	0,02	-0,01	0,30	0,26	0,33	1,00				
SO4	0,25	0,71	0,52	0,45	0,67	0,21	0,10	1,00			
NO3	-0,20	-0,27	-0,32	0,16	0,32	0,00	0,34	0,07	1,00		
SDT	0,19	0,41	0,33	0,43	0,68	0,22	0,50	0,66	0,31	1,00	
CE	0,20	0,47	0,35	0,43	0,66	0,23	0,52	0,65	0,28	0,96	1,00

Os parâmetros responsáveis pela salinidade das águas foram analisados por meio da técnica de regressão linear múltipla sequencial. Essas variáveis foram escolhidas em função das suas moderadas correlações com a CE. O  $R^2$  ajustado

apresenta valor de 0,83 mostrando que os parâmetros independentes explicam cerca de 83% da variabilidade da condutividade elétrica. A equação linear múltipla obtida foi: **CE = 249 + 2,9 Cl + 1,5 SO<sub>4</sub> + 0,8 (HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>)**. Esta equação mostra que a variação da salinidade, pela CE, na região está associada ao Cl (55,8%), SO<sub>4</sub> (28,8%) e HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub> (15,4%). A relação da CE com alcalinidade é explicada através da interação água/rocha carbonática, predominante na área de estudo. Com o sulfato a correlação pode ser ocasionada em razão da liberação de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) proveniente do intemperismo de níveis piritosos, comuns em ambientes endocársticos e que evoluem por oxidação para sulfatos. Finalmente, a maior correlação da CE com cloreto, pode estar associada com a influência da recarga por infiltração de águas meteóricas no sistema aquífero.

#### **4.2 Qualidade das águas subterrâneas**

A importante discussão em relação aos padrões de qualidade e uso das águas subterrâneas decorre da crescente utilização desses recursos para o consumo humano, dessedentação animal e irrigação. Neste caso a análise de restrição local, para os parâmetros químicos e físico-químicos, deu-se em consideração aos limites preconizados tanto pela legislação nacional quanto internacional de saúde e meio ambiente. Em relação ao fluoreto, estudos específicos demonstraram que a concentração ótima na água para o padrão de consumo precisa ser (re) ajustada localmente em função da temperatura média anual do ar. Coutinho (2014) pesquisou a fluorose dentária na região e determinou que o limite máximo de fluoreto para o consumo humano é de 0,8 mg/L. Entretanto a Portaria n° 2915/2011 do Ministério da Saúde determina que o limite máximo para o fluoreto seja de 1,5 mg/L. Neste trabalho por conta da

área de estudo está inserida em uma região com relatos de casos de fluorose dentária, foi estabelecido como limite máximo de fluoreto 0,8 mg/L.

Os resultados analíticos demonstram que o maior problema com a potabilidade para o consumo humano nas águas é relativo ao ânion nitrato, que possui concentrações acima do que é permitido na legislação em 47% das análises. O caso mais alarmante, refere-se ao poço B-10, que apresenta concentração de 55.9 mg/L. Considerando que este poço está localizado dentro do povoado de Santa Luzia no município de Carinhanha, a ocorrência do elevado teor de nitrato é resultante de fontes de poluição locais, decorrente da ausência de saneamento básico. Outras variáveis que excederam aos limites de potabilidade são o fluoreto em 20% das amostras e o cálcio e magnésio, ambas em 13%. Os valores excedentes de fluoreto nas águas de três poços são relativos ao mineral fluorita, que ocorre disseminado nos calcários e dolomitos da Formação Sete Lagoas (MISI *et al.*, 2007). Já os teores elevados de cálcio e magnésio, verificados em quatro poços, foram associados a interação entre a água subterrânea e as rochas carbonáticas. Apesar de ocorrerem alguns poços com águas salobras, os valores encontrados de STD não superam o limite de potabilidade (1.000 mg.L<sup>-1</sup>). Em relação a dessedentação animal e irrigação, de acordo com CONAMA N° 396/2008, os resultados demonstram que todos os poços estão com águas aptas para o consumo animal e que apenas dois poços (B-07 e B-11) não possuem águas apropriadas para agricultura por conta da relativa concentração elevada de fluoreto.

Para facilitar o entendimento sobre a qualidade das águas subterrâneas da área de estudo, foram individualizadas unidades de qualidade química e físico-química, sendo elas, boa, regular e restrita (figura 14). As unidades de

qualidade dessa pesquisa foram separadas essencialmente de acordo com os limites preconizados pela legislação e pelo estudo específico no caso do fluoreto, assemelhando-se à divisão utilizada por Oliveira *et al.*, 2007 para o “Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas-IQNAS”. As águas de boa qualidade química e físico-química da região, estão representadas pelos poços B-01, B-05, B-12 e B-13. São consideradas como águas subterrâneas de boa qualidade, todas aquelas que possuem as variáveis em apreço abaixo do limite máximo permitido para todos os usos e que sejam classificadas como água doce em relação a salinidade. Vale salientar que essas águas de qualidade boa são consideradas apropriadas para o consumo humano, de acordo com a legislação, entretanto deve-se alertar que para ingestão dessas águas subterrâneas, são necessárias análises biológicas a fim de saber a pureza das mesmas. Mas ao menos essas águas podem ser utilizadas para higiene pessoal e preparo de alimentos. A água com melhor qualidade química e físico-química entre todos os poços é encontrada no poço B-13.

As águas mais comuns na área de pesquisa, remete as de qualidade regular, recomendadas basicamente para dessedentação animal e irrigação, podendo ser utilizada também para limpeza doméstica. Estas águas apresentam altos teores de nitrato (valores entre 10 e 90 mg/L) e fluoreto intermediário (0,8 a 1,0 mg/L). As águas de qualidade restrita, ocorrem em dois poços (B-07 e B-11), estando apropriadas apenas para consumo animal devido a elevada concentração de fluoreto para irrigação (1 a 2 mg/L). No geral quanto menor as concentrações de sais e mais rasos os níveis piezométricos melhor a qualidade das águas (figura 14).



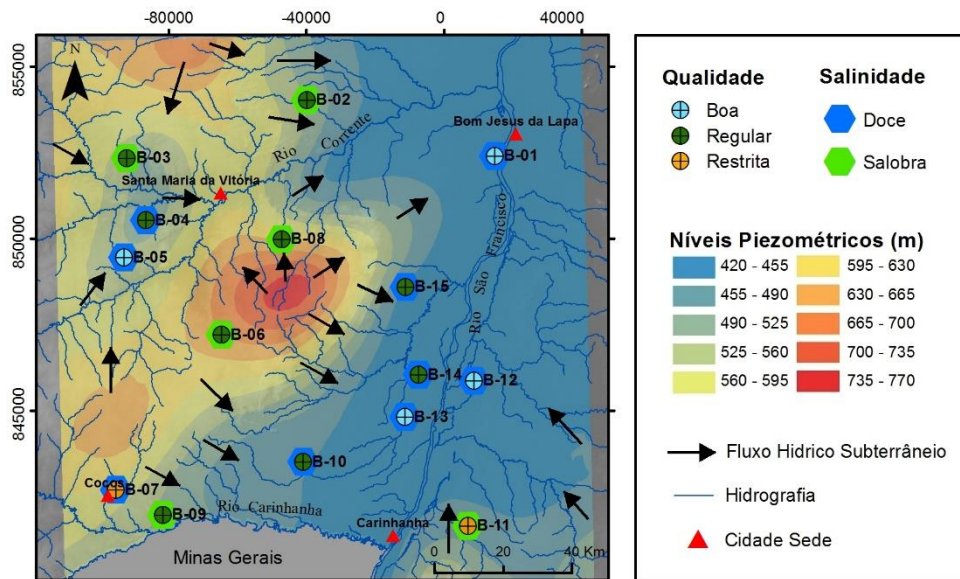


Figura 14: Mapa potociométrico e de qualidade das águas subterrâneas da área de estudo.  
 Figure 14: Potentiometric and groundwater quality map of the study area.

#### 4.4 Uso dos Isótopos Estáveis ( $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ )

O oxigênio 18 e o hidrogênio 2(deutério) são os isótopos estáveis mais pesados do oxigênio e do hidrogênio respectivamente. A abundância relativa destes isótopos na água varia em função de sua história no ciclo hidrológico. A variação das abundâncias dos isótopos estáveis decorre, principalmente, da água sofrer processos físicos de mudança de fase, como evaporação e condensação. Processos químicos e biológicos produzem menores variações (SANTIAGO *et al.*, 2008).

As medidas isotópicas das águas subterrâneas da área de estudo estão apresentadas na tabela 3. As amostras possuem valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  variando de -8,30‰ a -6,06‰ e -47,9‰ a -28,7‰, respectivamente.

Tabela 3: Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  nas águas subterrâneas da área de estudo.  
 Table 3: Values of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  in study area groundwater.

Isótopo	B-01	B-02	B-03	B-04	B-05	B-06	B-07	B-08	B-09	B-10	B-11	B-12	B-13	B-14	B-15
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-6,94	-6,06	-6,58	-7,31	-7,13	-7,47	-7,35	-7,48	-6,97	-7,24	-7,13	-8,30	-7,28	-7,27	-7,51
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-38,9	-28,7	-30,1	-37,0	-36,4	-37,5	-37,0	-40,2	-38,1	-33,9	-40,4	-47,9	-35,4	-31,5	-34,1

Os resultados demonstram que todas as águas apresentam valores negativos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , significando águas empobrecidas em isótopos pesados em relação ao padrão VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). Os dados isotópicos foram plotados em um gráfico de  $\delta^{18}\text{O}$  versus  $\delta^2\text{H}$  (figura 15) gerando uma linha meteórica local (LML), sendo comparada à composição isotópica da linha meteórica global (LMG). A LML foi definida pela regressão linear  $\delta^2\text{H} = 7,64 \cdot \delta^{18}\text{O} + 18,4\text{‰}$ , estando paralela e menos positiva em relação a linha meteórica global de regressão linear  $\delta^2\text{H} = 8,13 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10,8\text{‰}$ , sugerindo que as águas subterrâneas não teriam sofrido evaporação significativa durante a recarga, infiltrando rapidamente no aquífero cárstico através de dolinas, sumidouros, fraturas e diaclases.

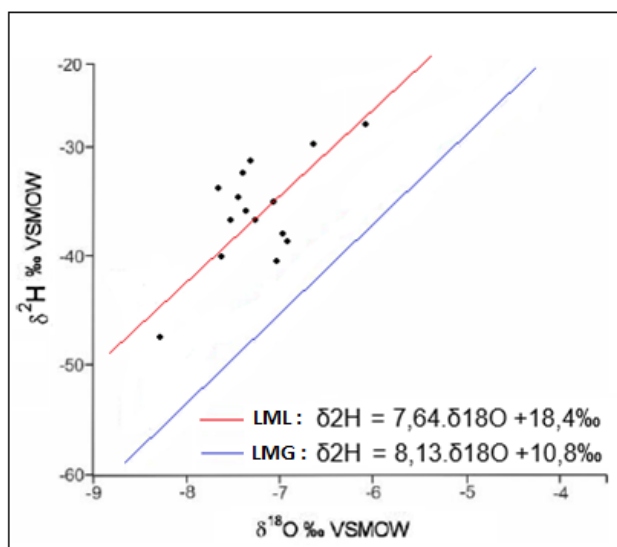


Figura 15: Gráfico ( $\delta^{18}\text{O}$  x  $\delta^2\text{H}$ ) da Linha meteórica local (LML) em comparação com a reta meteórica global (LMG).

Figure 15: Graph ( $\delta^{18}\text{O}$  x  $\delta^2\text{H}$ ) of the Local Meteorological Line (LML) in comparison with the global meteorological line (LMG).

A distribuição isotópica estável das águas subterrâneas na área de estudo, demonstra que os valores tendem a empobrecer no sentido NW para SE (figura 16). Influenciado pelo alto topográfico da Serra do Ramalho, uma barreira orográfica regional, a distribuição isotópica sugere que no mesmo período de

chuvas, as precipitações ocorreram preteritamente na porção norte-noroeste do polígono (na zona da sub-bacia do Rio Corrente), e um evento de precipitação posterior, com composição isotópica relativamente mais negativa, devido a depleção em isótopos pesados restantes das primeiras chuvas, ocorreu na porção sudeste da área. Outra hipótese é de que as águas localizadas na zona de influência do Rio Corrente possuem uma maior taxa de evaporação, refletindo nos valores dos isótopos (relativamente mais pesados). A água com valor isotópico mais negativo encontra-se no poço B-12, margem leste do Rio São Francisco (figura 16). As amostragens foram realizadas em maio, mês posterior ao período de chuva (novembro a abril) (INMET, 2018).

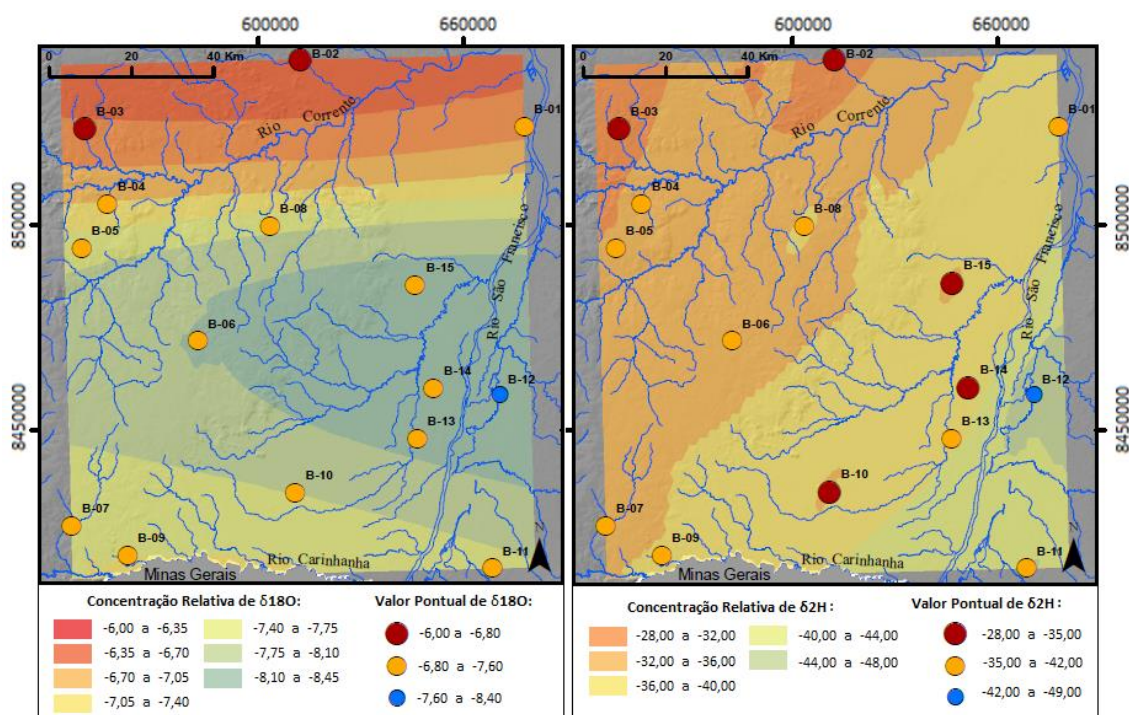


Figura 16: Distribuição espacial isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) nas águas subterrânea da área de estudo.

Figure 16: Isotopic spatial distribution ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$ ) in the study area groundwater.

## 5. Conclusão

A maior porcentagem das águas subterrâneas da área de pesquisa é classificada em termos hidroquímicos, como bicarbonatada cálcica, confirmando

os resultados obtidos pelos trabalhos de Camurugy, 2009 e Gonçalves, 2014. No atual trabalho, de acordo com o diagrama de Piper e pelas relações iônicas características, 67% das amostras foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas, 20% como bicarbonatadas magnesianas e 13% bicarbonatadas sódicas, revelando um cenário típico dos clássicos terrenos cársticos, no qual predomina os litotípos carbonáticos, principalmente os calcários cálcicos. A presença do sódio sugere a contribuição de recarga pela infiltração das águas meteóricas no sistema aquífero. Vale destacar que o poço B-08 apresenta um elevado teor em fosfato, podendo indicar a ocorrência de depósito de fosfato, a exemplo de outras áreas da bacia, como revelado por Misi *et al.*, 2007.

Em relação ao processo de salinização das águas, os resultados físico-químicos revelam que, de modo geral, as águas possuem pH neutro a levemente alcalino, com 60% de águas do tipo doce e 40% do tipo salobra. Foi possível evidenciar que as águas doces, tendem a ocorrer preferencialmente nos níveis piezométricos mais rasos, sugerindo influência do nível de base dos rios como diluidor das concentrações de sais. A matriz de correlação de *Spearman*, identificou que os parâmetros que mais influenciam a condutividade elétrica e, conseqüentemente, a salinidade, com correlações moderadas, são a alcalinidade ( $r_s = 0,52$ ) devido a relação água/rocha, sulfato ( $r_s = 0,65$ ) associado ao ácido sulfúrico proveniente de níveis piritosos, comuns em ambientes endocársticos, e cloreto ( $r_s = 0,66$ ), parâmetro com maior coeficiente de correlação, relacionado com a infiltração direta da água da chuva na zona vadosa através do epicarste. Por meio da técnica de regressão linear múltipla sequencial, sabe-se que esses parâmetros independentes, responsáveis pela salinidade, explicam cerca de 83% da variabilidade da CE, sendo que desse total,

a equação linear múltipla revela que o Cl está associado a 55,8%, o SO<sub>4</sub> a 28,8% e o HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub> a 15,4% dessa variabilidade.

Sobre a qualidade das águas para consumo humano, aproximadamente metade delas (47%) estão poluídas com nitrato, indicando contaminações locais do lençol freático, além de 20% contaminadas por fluoreto, 13% para cálcio e 13% para magnésio. Para irrigação, todos poços podem ser utilizados, com exceção dos poços B-07 e B-11 devido a elevadas concentrações relativas de fluoreto. Para dessedentação animal, todas as águas estão aptas para o uso. Apenas quatro amostras (B-01, B-05, B-12 e B-13) são consideradas como águas de boa qualidade, sujeitas a todo tipo de uso; duas amostras (B-07 e B-11) são consideradas como de qualidade restrita, apropriadas apenas para a desedentação animal; e finalmente, nove amostras, a maioria, são de qualidade regular, recomendada tanto para o uso na irrigação como no consumo animal.

Aos aspectos isotópicos, os resultados mostraram uma linha meteórica local paralela e menos positiva que a linha meteórica global, sugerindo que na região, as águas subterrâneas sofreram pouca evaporação durante a infiltração. A distribuição dos isótopos estáveis mostrou uma tendência ao empobrecimento em isótopos pesados ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) no sentido NW para SE, indicando recarga inicial preferencialmente na porção noroeste do polígono. Os isótopos demonstram também que no mesmo período de chuvas as precipitações ocorreram inicialmente na porção norte/noroeste do polígono, seguidas de um evento de precipitação com composição isotópica similar, porém mais negativo, na porção sudoeste da área. A Serra do Ramalho na porção central da área marca um divisor de águas que separa os dois eventos de precipitação no mesmo período de chuvas. Outra hipótese é de que na região da sub-bacia do

Rio Corrente, na porção noroeste da área de estudo, as águas infiltradas sofreram mais evaporação do que aquelas águas infiltradas ao longo da planície do Rio São Francisco. Possivelmente ocorreu a misturas de águas com pesos isotópicos diferentes, resultante da alta infiltração de águas por feições cársticas, como sumidouros e dolinas, comuns em toda região.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. B. M.; CASCAES, O. S. F. **Panorama hidrogeológico do Grupo Bambuí no Oeste da Bahia. In: 6º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas-ABAS, Porto Alegre, 1990.**Anais... Porto Alegre, 1990. p.50-57.
- CAMURUGY, E. B. **Uso da hidroquímica e isótopos estáveis ( $\delta D$  e  $\delta^{18}O$ ) no estudo da qualidade e origem das águas subterrâneas do aquífero cárstico da região oeste do Estado da Bahia.** Monografia de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Salvador, 2009. 66 p.
- Carreira, P. M., Marques, J. M., Nunes, D., 2014. **Source of groundwater salinity in coastline aquifers based on environmental isotopes (Portugal): Natural vs. human interference. A review and reinterpretation.** Applied Geochemistry 41 163–175.
- CLARK, I. D., AND P. FRITZ. **Environmental isotopes in hydrogeology.** CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1997.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 396, de 03 de Abril de 2008. **Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências.** Disponível em: <http://conama.gov.br>.
- COUTINHO, C. A. M. **A fluorose dentária na região cárstica do município de Santana-BA: definição de áreas de risco para consumo humano das águas subterrâneas com base nos dados hidroquímicos e epidemiológicos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Salvador, 2014. 164 p.
- DARDENNE, M. A. **Síntese sobre a Estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Recife, 1978. v. 2, p. 597-610, 1978.
- GONÇALVES, MANUEL VITOR PORTUGAL. **Flúor nas águas subterrâneas do Aquífero Bambuí no Sudoeste da Bahia (Brasil) / Manuel Vitor Portugal Gonçalves.** – Salvador, 2014. 193 f.: Color.

HIRATA, R. **Recursos Hídricos**. In: TEIXEIRA, W . [et al.]. Decifrando a Terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 422 - 444.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **IBGE Cidades@**. Acessível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?> Disponível em: 02.02.2012.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia: Normais Climatológicas**. Brasília. 2018. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/html/observacoes.php](http://www.inmet.gov.br/html/observacoes.php)>. Acesso em: 02 fev. 2018.

MARTINS, V.S. **Estudo de inclusões fluidas e de isótopos de estrôncio dos depósitos de fluorita da Serra do Ramalho (Bahia) e Montalvânia (Minas Gerais)**. 2001. 89f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

MISI A. *et al.* **Chemostratigraphic Correlation of Neoproterozoic successions in South America**. *Chemical Geology*, v. 237, p. 161-185, 2007.

OLIVEIRA, I.B., NEGRÃO, F.I., SILVA, A.G.L.S. **Mapeamento dos Aquíferos do Estado da Bahia utilizando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS**. *Revista Científica Água Subterrânea*, vol. 21, n. 1, p. 123-137.2007.

RAMOS, M.L.S.; PAIXÃO, M.M.O.M. **Disponibilidade hídrica de águas subterrâneas - Produtividade de poços e reservas explotáveis dos principais sistemas aquíferos**. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), 2003.

REIS, CAROLINA. **Geologia, Sistemas Depositionais e Estratigrafia Isotópica do Grupo Bambuí na Região de Santa Maria da Vitória, BA / Carolina Reis**. -- Brasília, 2013. 97 f. Il., color. ; 1 mapa em anexo.

RIMANN, E.T. 1917. **A kimberlita no Brasil**. *Anais da Escola de Minas, Ouro Preto*, 15:27-32.

SANTIAGO M. F. FRISCHKORN H. SILVA C. M. S. V. **HIDROGEOLOGIA CONCEITOS E APLICAÇÕES 3ª Edição - Revisada e Ampliada**. Capítulo 4.3, págs 255 a 270. 2008.

ZOBY, J. L. G.; MATOS, B. A.; CONEJO, J. G. (2004) **Disponibilidade de Águas Subterrâneas na Bacia do Rio São Francisco**. São Paulo, Brasil: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 21pp.

W.H.O. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. 2003. Recommendations. Addendum. Geneva. 3rd edition.v.1.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÕES GERAIS

---

#### 4.1 Conclusões

A avaliação química, físico-química e Isotópica ( $\delta^{2}\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ ) nas águas subterrâneas foi realizada para caracterizar o aquífero Bambuí, de natureza predominantemente cárstica, na região sudoeste da Bahia. Pode-se determinar que as águas subterrâneas da área de pesquisa, em termos hidroquímicos, são classificadas majoritariamente como bicarbonatadas cálcicas, confirmando os resultados alçados pelos trabalhos de hidroquímica de Camurugy, 2009 e Gonçalves, 2014. Nesta pesquisa, de acordo com o diagrama de Piper e pelas relações iônicas características, 67% das amostras coletadas foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas, 20% como bicarbonatadas magnesianas e 13% bicarbonatadas sódicas. Os resultados indicam um ambiente típico dos aquíferos cársticos dominados pelos litótipos carbonáticos, principalmente os calcários calcíticos, com ocorrências limitadas de níveis dolomíticos. As bicarbonatadas sódicas sugerem a presença de águas meteóricas infiltradas rapidamente por feições cársticas no sistema aquífero. O poço B-08 apresenta um elevado teor em fosfato, evidenciando a ocorrência de alguma fonte geogênica próximo ao ponto de amostragem, podendo chegar a ser um depósito de fosfato, a exemplo de outras áreas da bacia Bambuí-Una, descritos por Misi *et al.*, 2007.

Em relação ao processo de salinização das águas, os resultados físico-químicos referentes aos sólidos totais dissolvidos (STD), apresentam 60% de águas do tipo doce e 40% de águas do tipo salobra. Através da interceptação de



dados de STD e o mapa potenciométrico da área de estudo, foi possível evidenciar que as águas doces, tendem a ocorrer preferencialmente nos níveis piezométricos mais rasos, sugerindo influência do nível de base como diluidor das concentrações de sais nas águas. Foi realizada uma análise estatística, através da matriz de correlação de *Spearman*, para maior confiabilidade probabilística, com 65 amostras (15 da pesquisa atual mais 50 da CERB/SIAGAS), identificando como parâmetros que mais influenciam a CE e conseqüentemente a salinidade, os íons alcalinidade ( $r= 0,52$ ) devido a relação das águas com a rocha, sulfato ( $r=0,65$ ) associado a liberação de ácido sulfúrico proveniente de níveis piritosos, comuns em ambientes endocársticos, e cloreto ( $r=0,66$ ), parâmetro com maior coeficiente de correlação, demonstrando uma alta renovação de águas meteóricas no aquífero Bambuí, resultante da boa infiltração direta (recarga concentrada) da água da chuva na zona vadosa através do epicarste. Por meio da técnica de regressão linear múltipla sequencial, sabe-se que esses parâmetros, explicam cerca de 83% da variabilidade da CE, sendo que desse total, a equação linear múltipla demonstra que o Cl está associado a 55,8%, o SO<sub>4</sub> a 28,8% e o HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub> a 15,4% dessa variabilidade.

Utilizando das informações conjunta acerca dos parâmetros químicos e físico-químicos, foi possível fazer um levantamento sobre a qualidade das águas subterrâneas da área de estudo, levando-se em consideração os limites máximos permitidos, preconizados pela Resolução nº 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Portaria nº.2914/11, do Ministério da Saúde, BRASIL, 2011 assim como pela Organização Mundial da Saúde (WHO,2003). As análises revelam e alertam que aproximadamente metade das águas subterrâneas coletadas (47%) estão poluídas com nitrato, sugerindo

presença de fonte de contaminação, que pode ser a utilização de fertilizantes nitrogenados nas áreas de irrigação e o despejo de efluente sem tratamento, decorrentes da ausência de saneamento básico na maioria das cidades e povoados da região; 20% das águas estão contaminadas com fluoreto, 13% cálcio e 13% magnésio, sendo que tais elementos tem como fonte a ocorrência natural ou geogênica nos carbonatos, pelos minerais fluorita, calcita e dolomita respectivamente. Para irrigação todos poços podem ser utilizados, com exceção dos poços B-07 e B-11 devido a elevadas concentrações relativas de fluoreto. Para dessedentação animal, as águas de todos os poços estão aptas para o uso. Foi confeccionado um mapa de qualidade química e físico-química das águas subterrâneas, separando as águas em níveis de qualidade. Conclui-se que apenas quatro amostras (B-01, B-05, B-12 e B-13) são consideradas como águas de boa qualidade, estando associadas as águas doces (baixa concentração relativa de STD), sujeitas a todo tipo de uso. Duas amostras (B-07 e B-11) são consideradas como de qualidade restrita, sendo apta apenas para a dessedentação animal; e nove amostras (a maioria das águas), são classificadas qualitativamente como de nível regular, recomendada tanto para o uso na agricultura como no consumo animal.

Sobre os aspectos isotópicos das águas subterrâneas do aquífero Bambuí no polígono de estudo, os resultados demonstram que todos os valores dos isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  apresentam-se em uma linha meteórica local que comparada com a linha meteórica global, sugere que na região, as águas sofreram pouca evaporação durante infiltração, relativamente rápida, a partir de feições cársticas superficiais como dolinas e sumidouros. Em relação à distribuição dos isótopos estáveis, os valores revelam uma tendência ao

empobrecimento em isótopos pesados ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) no sentido NW para SE, indicando recarga inicial preferencialmente na porção noroeste do polígono. Os dados isotópicos demonstram também que no mesmo período de chuvas as precipitações ocorreram inicialmente na porção norte/noroeste do polígono, e um evento de precipitação posterior com composição isotópica similar, porém mais negativa, ocorreu na porção sudoeste da área. O divisor de águas da Serra do Ramalho na porção central da área, marca uma linha dividindo esses dois eventos de precipitação no mesmo período de chuvas. Outra hipótese é de que na região da sub-bacia do Rio Corrente, na porção noroeste da área de estudo as águas infiltradas sofreram mais evaporação do que aquelas águas infiltradas ao longo da planície do Rio São Francisco. Possivelmente ocorreu mistura de águas com pesos isotópicos diferentes. A infiltração das águas nas regiões de predomínio cárstico é relativamente alta.

#### **4.2 Recomendações**

Por fim, para futuros estudos nesta região do aquífero Bambuí, recomenda-se que sejam realizadas um maior número de coletas e em diferentes épocas do ano, ou seja, coletas na estação seca e na estação das chuvas, e que sejam coletadas amostras também dos rios e dos aquíferos sobrepostos do Grupo Urucua para melhor entendimento da dinâmica, composição, salinidade e recarga das águas na região. Em relação ao problema com a poluição de nitrato e fluoreto, e a anômala ocorrência de fosfato no ponto B-08, recomenda-se um monitoramento mais intensivo nesses poços, a fim de se alcançar uma análise detalhada acerca da origem destas elevadas concentrações.

## APÊNDICIE A

Justificativa da participação dos co-autores do artigo “Hidrogeoquímica e Isótopos Estáveis das Águas Subterrâneas do Aquífero Bambuí (Bahia, Brasil)”

Sérgio Augusto do Nascimento Moraes – orientador.

Cezar Augusto Teixeira Falcão Filho - Participação no tratamento dos dados.

Lucas de Queiroz Salles – Contribuições nas discussões do artigo.

## ANEXO A

## Banco de Dados – Poços da Área de Estudo

Poço	Nº CERB	Município	Localidade	x (utm)	y (utm)
B-01	*	Serra do Ramalho	Baraúna I	665152	8527886
B-02	*	Santana	Varzea do Morão II	611138	8545401
B-03	*	Santa Maria da Vitória	Fz. Poço do Mateiro	558564	8529841
B-04	*	Jaborandi	Poço do Brejo II	563591	8511698
B-05	*	Jaborandi	Fz. Vitorino	557007	8501042
B-06	*	Coribe	Descoberto	584655	8478016
B-07	*	Cocos	Cubículo	552968	8433903
B-08	*	São Felix do Coribe	Assentamento Bom Sucesso	602853	8505218
B-09	*	Feira da Mata	Pajeu/ Juazeirinho	566378	8426283
B-10	*	Carinhanha	Varzia da Cruz	607357	8440565
B-11	*	Malhada	Canto do Riacho	654646	8420881
B-12	*	Malhada	Parateca	657507	8462915
B-13	*	Carinhanha	Cara Suja	637284	8452821
B-14	*	Carinhanha	Terra Nova	641582	8464998
B-15	*	Serra do Ramalho	Agrovila 13	638370	8490556
B-16	1-8761/07	Bom Jesus da Lapa	Marambaia	678268	8531460
B-17	1-8653/07	Bom Jesus da Lapa	Tamburil	689317	8575425
B-18	1-4886/89	Coribe	Fz. Boqueirão	588480	8500351
B-19	1-4771/88	Coribe	Lagoa dos Índios	567966	8448891
B-20	2-3768/10	Coribe	Mata do Cipó	583622	8466296
B-21	1-8852/08	Feira da Mata	Lagoa Nova	594130	8442571
B-22	1-8856/08	Feira da Mata	Olho D'água	572449	8442826
B-23	2-3542/10	Carinhanha	Cara Suja	637284	8452821
B-24	2-3539/10	Carinhanha	Poço dos Porcos/ Canabrava	625843	8463328
B-25	2-3554/10	Carinhanha	Terra Nova	641582	8464998
B-26	1-4862/89	Carinhanha	Araca	654192	8410931
B-27	1-4870/89	Carinhanha	Capoeira	652247	8391890
B-28	1-4863/89	Carinhanha	Casa Armada II	653916	8410042
B-29	1-4864/89	Carinhanha	Lagoa da Onca	646549	8385102
B-30	1-4865/89	Iuiú	Lagoa Torta	650856	8384707
B-31	1-4868/89	Iuiú	Mata Grande	656710	8387590
B-32	1-4866/89	Iuiú	Serrinha	653401	8389793

B-33	1-9116/08	Iuiú	Juazeiro II	646750	8403878
B-34	1-9108/08	Iuiú	Baraúna	658136	8399966
B-35	1-9113/08	Iuiú	Pindorama II	653343	8390131
B-36	1-9374/09	Iuiú	Agreste de Dentro	663998	8407918
B-37	1-9314/09	Iuiú	Sede V	656106	8405572
B-38	1-9313/09	Iuiú	Sede IV	655599	8406159
B-39	1-9317/09	Cocos	Sede VI	656265	8407261
B-40	1-9453/10	Cocos	Lajedinho/ Morro do Defunto	654417	8403892
B-41	2-3556/10	Cocos	Desterro Um	552948	8438880
B-42	1-8841/08	Cocos	Várzea	549213	8429702
B-43	1-8956/08	Cocos	Santa Rosa	555785	8447046
B-44	1-9286/09	Cocos	Capitão do Mato/ José Joaquim	538724	8411041
B-45	1-9283/09	Cocos	Lagoa do Boi II	557800	8436351
B-46	2-3804/10	Cocos	Hospital Municipal/ Posto de Saúde	550448	8432649
B-47	2-3533/10	Malhada	Pau Pintado/ Cachoeira	627048	8398701
B-48	1-1305/81	Palmas de Monte Alto	Pinga Fogo	683807	8425176
B-49	1-5050/91	Palmas de Monte Alto	Mocambo de Cima/ Alto B	690888	8414089
B-50	1-4871/89	Palmas de Monte Alto	Casa Velha	688428	8413708
B-51	1-8892/08	Palmas de Monte Alto	Tábua/ Bom Jardim	687577	8428253
B-52	2-3670/10	Serra do Ramalho	Taquari de Cima	629695	8501595
B-53	1-1276/81	Santa Maria da Vitória	Brejo do Espírito Santo	579397	8528675
B-54	1-4769/88	Santa Maria da Vitória	Sussuarana	539422	8556902
B-55	1-4894/89	Santa Maria da Vitória	Ponte Velha/ Tabuleirinho	541541	8543905
B-56	1-8824/08	Santa Maria da Vitória	Cavalo Morto/ Buraquinho	545315	8550626
B-57	1-8817/08	Santa Maria da Vitória	Mutum do Macaco	550280	8549081
B-58	1-4910/90	Correntina	Barra de São José	554072	8518016
B-59	1-8788/08	Correntina	Baixa Grande do Snt Antônio/ Tabocas	537353	8541730
B-60	1-1284/81	São Felix do Coribe	Serra Pintada	609998	8507122
B-61	1-9281/09	São Felix do Coribe	Assentamento Bom Sucesso	602454	8507582
B-62	2-3498/10	São Felix do Coribe	Cacimca do Taquari	608617	8492718
B-63	2-3489/10	São Felix do Coribe	Queimadas	618384	8526812
B-64	2-3495/10	São Felix do Coribe	Barreiro	589087	8511010
B-65	1-10014/12	São Felix do Coribe	Assentamento Bom Sucesso II	611787	8517899

Obs: \* - Poços do campo.

## ANEXO B

## COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO



## #29210 Sinopse

[RESUMO](#) [AVALIAÇÃO](#) [EDIÇÃO](#)

## Submissão

Autores	Júlio Vieira Carvalho
Título	HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS ESTÁVEIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO AQUIFERO BAMBUÍ (BAHIA, BRASIL)
Documento original	29210-107850-1-SM.DOCX 28-08-2018
Docs. sup.	Nenhum(a) <a href="#">INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR</a>
Submetido por	Carvalho J V Júlio Vieira Carvalho
Data de submissão	28 de agosto de 2018 - 01:10
Seção	Artigos
Editor	Nenhum(a) designado(a)

## Situação

Situação	Aguardando designação
Iniciado	28-08-2018
Última alteração	28-08-2018