



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos



República Federativa do Brasil

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

Ministério do Meio Ambiente

Edson Duarte

Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Tibério Magalhães Pinheiro

Victor Sucupira

Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Leonardo de Almeida (Gestor do Contrato)

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

***Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco
para a Gestão de Recursos Hídricos***

RELATÓRIO FINAL

VOLUME II - HIDROGEOLOGIA

© 2018 Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T
CEP: 70610-200, Brasília – DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Capa:

Local da Foto: Gruta da Toca da Boa Vista, Campo Formoso, BA, sub-bacia do rio Salitre.

Fotografia – Rangel Carvalho

Equipe:

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF:

Leonardo de Almeida (ANA)	Márcia Tereza Pantoja Gaspar (ANA)
Zoltan Romero C. Rodrigues (SEMA-BA)	Maricene Menezes de O. M. Paixão (IGAM – MG)

Elaboração e Execução - Consórcio TPF/TECHNE

Direção Geral e Coordenação do Contrato

João Guimarães Recena – Direção Geral
Luiz Alberto Teixeira – Direção Geral
Antônio Carlos de Almeida Vidon – Direção Geral
Maria Ângela Capdeville Duarte Ulmann – Direção Geral
Fábio Chaffin Barbosa – Direção Geral
Roberta de Mello Guedes Alcoforado - Coordenação Geral do Contrato
Marcelo Casiuch – Coordenação Adjunta do Contrato

Membros da Equipe Chave

Edilton Feitosa – Coordenação Técnica
João Manoel Filho – Coordenação Técnica Adjunta
Natalina Maria Tinôco Cabral – Hidrogeoquímica
Paula Stein – Hidrogeoquímica
Paulo Fernando P. Pessoa – Geólogo especialista em Carste

Membros da Equipe Técnica Executora

Alerson Falieri Suarez	Gustavo Grillo	Paulo de M. da Cunha Pedrosa
Alípio Agra	Gustavo Sobral	Rinaldo Fernandes
Ana Nery Cadete	Joanderson J. O. Moraes	Sandro Barbosa Figueira
Bruno Marcionilo	José Augusto Vieira Filho	Thiago Franklin S. de Almeida
Daniel Quintino	Ludmilla de Oliveira Calado	Vanessa Costa
Dora Atman	Marcondes Assis	Walter Lucena
Fabianny Bezerra	Marcos A. Barbosa S. Jr.	Bruna Duarte (estagiária)
Flávia Azevedo Pedrosa	Mário Nascimento S. Filho	Gadadhara Figueiredo (estagiária)
Ginaldo A. da Cruz Campanha	Nelson da Franca dos Anjos	Geraldo M. Junior (estagiário)
Giseli Kimura	Patrícia Celeste L. Jesuíno	

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada à fonte.

A265h Agência Nacional de Águas (Brasil).
Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Final – VOLUME II - HIDROGEOLOGIA / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018.
217p.
1. Hidrogeologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. São Francisco, Rio
I. Título.

CDU 556.51

APRESENTAÇÃO

O Relatório Final da Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos apresenta os resultados dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do Contrato nº 037/ANA/2013, adjudicado pela Agência Nacional de Águas – ANA – ao Consórcio TPF / Techne, em agosto de 2014.

Consolida os estudos realizados, apresentados em oito Relatórios Parciais, além de algumas notas técnicas, elaborados de acordo com o Termo de Referência elaborado pela Agência Nacional de Águas.

Tais estudos tem como objetivo a geração de conhecimento hidrogeológico sobre os Sistemas Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos da região hidrográfica do São Francisco, suas relações com o Sistema Aquífero Urucua e suas contribuições para o fluxo de base do rio São Francisco. Os estudos subsidiaram a elaboração de uma Proposta de Plano de Gestão Integrada e Compartilhada dos Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos da Região Hidrográfica do São Francisco.

Os Sistemas Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos abordados no presente estudo apresentam uma área de exposição de 110.951,4 km². Nessa área foi dada ênfase a 3 pilotos localizados nas bacias do Rio do Vieira (Montes Claros/MG), Rio São Desidério (São Desidério/BA) e Riacho do Juá (Lapão/BA) (Figura 1).

O Relatório Final é estruturado em quatro volumes e um Resumo Executivo, conforme mostrado a seguir.

- Volume I – Diagnóstico dos Meios Físico e Socioeconômico
- Volume II - Hidrogeologia
- Volume III – Áreas Piloto
 - Tom 1 – Área Piloto do rio São Desidério/BA
 - Tom 2 - Área Piloto do rio do Vieira/MG
 - Tom 3 - Área Piloto do riacho do Juá/BA
- Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos
 - Tom 1 – Balanço Hídrico
 - Tom 2 – Cenários e Propostas de Gestão
- Resumo Executivo

E ainda três Relatórios Técnicos Temáticos:

- Relatório Técnico Temático de Hidroquímica
- Relatório Técnico Temático dos Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos
- Relatório Técnico Temático de Cartografia/SIG

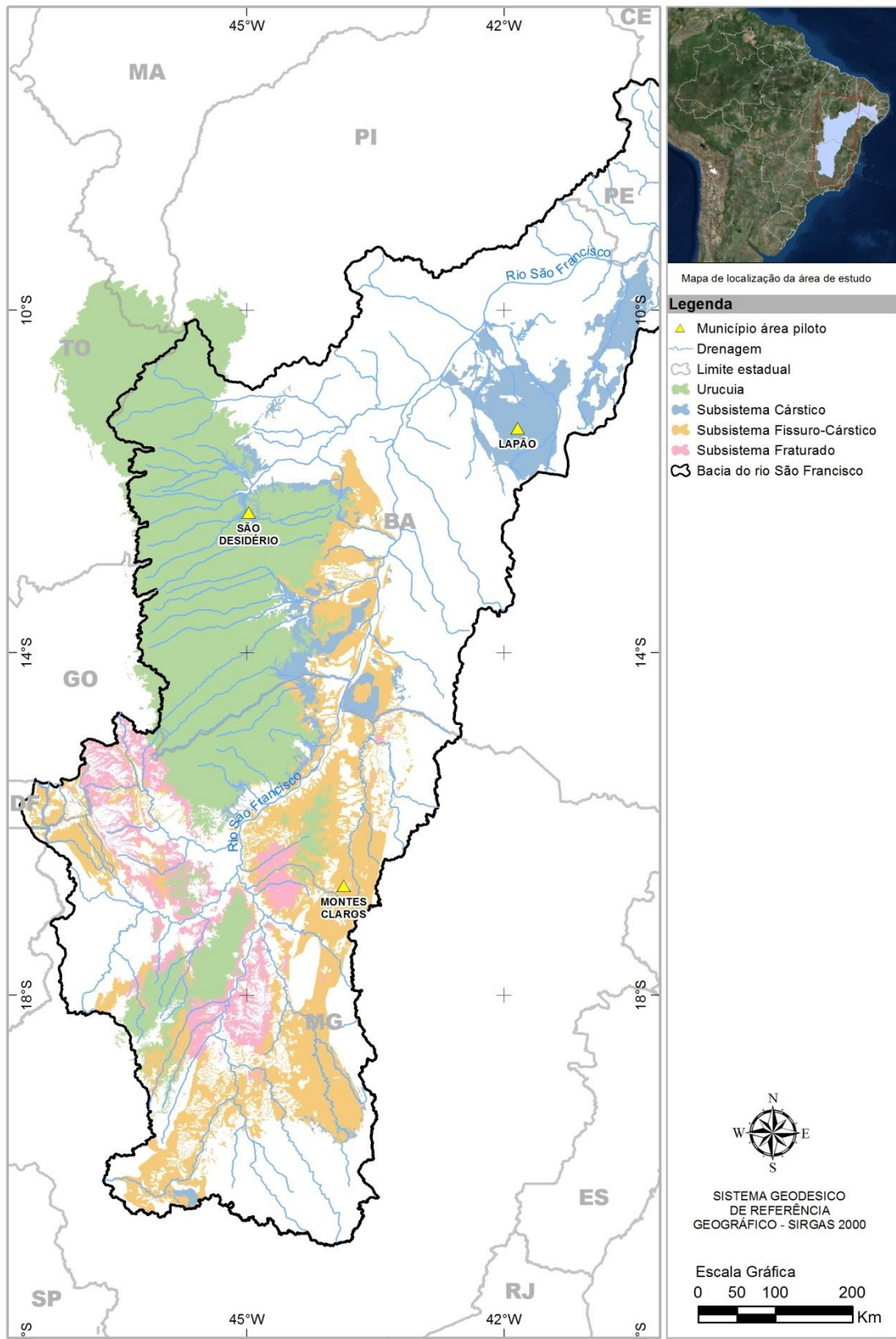


Figura 1: Área de estudo, destacando os sistemas cársticos e fissuro cársticos, e as Áreas Piloto

Os estudos envolveram trabalhos de campo e de escritório cujos detalhamentos são apresentados e discutidos nos volumes e tomos indicados.

Os trabalhos de campo consistiram de cadastramento de pontos d'água e de fontes de contaminação, sendo cadastrados 351 novos poços. Foram realizadas duas campanhas de medição de níveis e de coleta de água para estudos hidroquímicos, 203 poços amostrados no período seco entre agosto e setembro de 2014, e 206 poços no período chuvoso entre março e abril de 2015. Nas áreas Piloto foram realizados mapeamento geológico, estudos geofísicos, ensaios de traçadores (com Rodamina WT e Fluoresceína), testes de aquífero. Para os estudos geofísicos utilizou-se o método gravimétrico e da eletrorresistividade (sondagens elétricas verticais e caminhamentos elétricos). Em alguns poços selecionados realizou-se perfilagem ótica e geofísicas.

Os trabalhos de escritório consistiram nas interpretações de dados obtidos com a formatação de banco de dados com mais de 20.000 poços tubulares, elaboração de relatórios e geoprocessamento, secundados por programações, elaboração de notas técnicas e participação em cerca de 22 reuniões de trabalho ocorridas nas cidades de Recife, Brasília, Belo Horizonte, Montes Claros, Salvador e Juazeiro, em conjunto com a CTAF - Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF, composta por técnicos, representantes indicados pelos estados abrangidos pelos estudos (Minas Gerais e Bahia). A CTAF procedeu o acompanhamento e avaliação de todas as fases dos estudos, juntamente com representantes da ANA.

Os conhecimentos obtidos subsidiaram a elaboração de uma proposta de Plano de Gestão Integrada e Compartilhada das Águas Superficiais e Subterrâneas da Região Hidrográfica do São Francisco, que pretende contribuir ao manejo adequado dos recursos hídricos dos estados de Minas Gerais e Bahia.

SUMÁRIO

1	Introdução	19
2	Hidrogeologia Regional	19
2.1	O Sistema Aquífero Bambuí	37
2.2	O Sistema Aquífero Salitre	41
2.3	O Sistema Aquífero Urucuia (SAU).....	43
3	Cadastramento de Usuários e Pontos de Água	45
3.3	Cadastro de Pontos d'Água/Fontes de Contaminação	48
3.3.1	Pontos d'Água	48
3.3.2	Fontes de contaminação	49
4	Mapa de Aquíferos e Produtividade	53
4.1	Potencial de produção de água subterrânea	56
4.2	Produtividade por Unidade Hidrogeológica.....	57
4.2.1	Unidade Granular	57
4.2.2	Unidade Cárstica (K)	58
4.2.3	Unidade Fissuro-Cárstica	58
4.3	Reservas e Recargas	60
4.4	Comentários.....	61
5	Domínios e subdomínios hidrogeológicos.....	61
5.1	Metodologia para cartografia do carste.....	62
5.1.1	Mapeamento das unidades cársticas e estrutura física.....	63
5.1.2	Definição das unidades cársticas	65
5.2	Definição dos domínios hidrogeológicos	65
5.1.3	Domínio I – Vazante	67
5.1.4	Domínio II – Grupo Bambuí deformado W	67
5.1.5	Domínio III – Grupo Bambuí Pouco Deformado	68
5.1.6	Domínio IV – Grupo Bambuí deformado E	69
5.1.7	Domínio V – Bacia de Irecê muito deformada	70
5.1.8	Domínio VI – Bacia de Irecê pouco deformada	70
5.1.9	Domínio VII – Bacia Salitre.....	70
5.2	Aquíferos nos subdomínios	71
6	Análise das cargas hidráulicas.....	73
6.1	Organização dos dados	74
6.2	Análise dos dados.....	76
6.2.1	Correlação cargas hidráulicas x pluviometria	76

6.2.2	Análise pluviométrica regional	76
6.2.3	Superfícies potenciométricas	79
6.2.4	Diferença entre superfícies potenciométricas - Regional	81
6.3	Considerações sobre a abordagem adotada	84
7	Hidroquímica regional	85
7.1	Amostragem e Análises	85
7.1.1	Qualidade analítica dos dados.....	90
7.2	Hidrogenoquímica da Subárea Regional 1 - Irecê	93
7.2.1	Caracterização das Águas	95
7.2.2	Fácies hidroquímicas	110
7.2.3	Parâmetros Específicos	111
7.2.3.1	Metais Pesados	111
7.2.3.2	Agroquímicos	112
7.2.3.3	Derivados de Petróleo.....	112
7.2.4	Qualidade das Águas para o Consumo Humano	113
7.2.5	Avaliações Isotópicas	115
7.2.5.1	Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}O$) e Deutério (δ^2H).....	116
7.2.5.2	Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}Sr/^{86}Sr$)	116
7.3	Hidrogenoquímica da Subárea Regional 2 - São Desidério.....	117
7.3.1	Caracterização das Águas	120
	Amostras do Bambuí aflorante.....	123
7.3.1.1	Amostras do Bambuí com cobertura	131
7.3.1.2	Amostras Poço Urucuia e Poço Misto	134
7.3.2	Caracterização de grupos através de diagramas Box & Whisker..	135
7.3.3	Fácies hidroquímicas.....	137
7.3.4	Parâmetros Específicos.....	139
7.3.4.1	Metais Pesados	139
7.3.4.2	Agroquímicos	140
7.3.4.3	Derivados de Petróleo	141
7.3.5	Qualidade das Águas para o Consumo Humano	142
7.3.6	Avaliações Isotópicas	145
7.3.6.1	Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}O$) e Deutério (δ^2H)	146
7.3.6.2	Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}Sr/^{86}Sr$)	147
7.4	Hidrogenoquímica da Subárea Regional 3 - Montes Claros	149
7.4.1	Caracterização das Águas	151
7.4.2	Fácies hidroquímicas.....	167

7.4.3	Parâmetros Específicos.....	172
7.4.3.1	Metais Pesados.....	172
7.4.3.2	Agroquímicos	172
7.4.3.3	Derivados de Petróleo	177
7.4.4	Qualidade das Águas para o Consumo Humano	178
7.4.5	Avaliações Isotópicas	181
7.4.5.1	Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério ($\delta^2\text{H}$)	181
7.4.5.2	Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	184
7.4.6	Considerações Finais	185
8	Vulnerabilidade e perigo de contaminação	187
8.1	Metodologia EPIK	188
8.1.1	Epicarste (E).....	188
8.1.2	Cobertura de proteção (P)	190
8.1.3	Condições de infiltração (I).....	190
8.1.4	Grau de desenvolvimento da rede cárstica (K)	193
8.2	Metodologia POSH	196
8.2.1	Análise do potencial contaminante	196
8.2.2	Avaliação do perigo de contaminação dos aquíferos	200
9	Referências Bibliográficas.....	202
10	Anexos	217

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Poços selecionados inicialmente a partir do SIAGAS.	46
Tabela 3.2 – Fontes contaminantes levantadas na área total de trabalho.	51
Tabela 4.1 – Unidades Hidrogeológicas de Fluxo da Bacia do Rio São Francisco.	53
Tabela 4.2 – Classes de produtividade de aquífero na Bacia do Rio São Francisco. .	56
Tabela 4.3 – Classes de produtividade no Domínio Granular	58
Tabela 4.4 – Classes de produtividade na Unidade Cárstica	58
Tabela 4.6 – Reservas permanentes e recargas.....	60
Tabela 4.7 – Classes globais de produtividade independente das unidades hidrogeológicas	61
Tabela 7.1 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise.....	90
Tabela 7.2 – Avaliação das amostras com erros entre 10 e 20% mediante aplicação da Equação 4.3.	91
Tabela 7.3 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período seco (n=42).	95
Tabela 7.4 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período úmido (n=42).	96
Tabela 7.5 - Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979)	101
Tabela 7.6 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Irecê	111
Tabela 7.7 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.....	112
Tabela 7.8 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011), avaliadas no presente estudo.	113
Tabela 7.9 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade, avaliadas no presente estudo.....	114
Tabela 7.10 - Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano, na área regional de Irecê.	115
Tabela 7.11 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Irecê.	115

Tabela 7.12 - Sumário estatístico das águas do Bambuí aflorante, coletadas nos períodos seco e úmido (n=40).....	120
Tabela 7.12 - Sumário estatístico das águas do Bambuí aflorante, coletadas nos períodos seco e úmido (n=40) – Continuação.....	121
Tabela 7.13 – Sumário estatístico das águas do Bambuí com cobertura, coletadas no período seco e úmido (n=22).	122
Tabela 7.13 – Sumário estatístico das águas do Bambuí com cobertura, coletadas no período seco e úmido (n=22) – Continuação.	123
Tabela 7.14 – Resultados físico-químico e químico das águas do poço Urucua e do poço Misto, no período seco e úmido.....	135
Tabela 7.15 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L).	140
Tabela 7.16 – Pontos de coleta para determinação de agroquímicos.....	141
Tabela 7.17 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.....	141
Tabela 7.18 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo.	142
Tabela 7.19 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade, avaliadas no presente estudo.....	143
Tabela 7.20 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano.....	144
Tabela 7.21 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de São Desidério.	145
Tabela 7.22 – Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período seco (n=94).....	151
Tabela 7.23 - Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período úmido (n=93).	152
Tabela 7.24 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros	173
Tabela 7.25 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.....	177
Tabela 7.26 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo.	179
Tabela 7.27 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade.	180

Tabela 7.28 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano, na área regional de Montes Claros.	180
Tabela 7.29 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Montes Claros.	181
Tabela 8.1 - Valores de ponderação dos parâmetros do EPIK adaptado	193
Tabela 8.2 - Classes de vulnerabilidade do índice EPIK adaptado	193
Tabela 8.3 – Fontes potenciais de contaminação com índice POSH.....	196
Tabela 8.4 – Tipos de indústrias com índice POSH.	197
Tabela 8.5 – Classificação do perigo à contaminação.	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: O Cráton do São Francisco e os grupos Bambuí e Una (Alkmim et al 1993)	20
Figura 2.2: Principais unidades geológicas que configuram o espaço geográfico da bacia do rio São Francisco (CPRM 2003)	27
Figura 2.3: Tipologias aquíferas na área de interesse ao estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissural na bacia do rio São Francisco (CPRM 2003)	29
Figura 2.4: Corte geológico esquemático no centro-oeste da Bahia. Topografia obtida do Google Earth. Geologia aproximada de CPRM/CBPM (2003).	37
Figura 2.5: Corte geológico esquemático N-S do Grupo Bambuí. Topografia obtida do Google Earth. Geologia aproximada de CPRM/CBPM (2003) e CPRM/COMIG (2003).	40
Figura 2.6: A bacia de Irecê. Adaptado de Kuchenbecker et al. (2011).	41
Figura 2.7: Localização do Sistema Aquífero Urucuia – SAU (ANA 2017).....	44
Figura 3.1: Universo dos poços selecionados	47
Figura 3.2: Frequência absoluta das profundidades	48
Figura 3.3: Porcentagem do cadastramento de poços geral.	49
Figura 3.4: Uso e ocupação do solo na área de estudo com as fontes contaminantes.	52
Figura 4.1: Articulação das folhas na escala de 1:250.000 do Mapa de Aquíferos do Sistema Aquífero Bambuí na Região Hidrográfica do São Francisco e das folhas das Áreas Piloto na escala 1:100.000 (São Desidério) e na escala 1:50.000 (Riacho Juá – Irecê, BA e Rio do Vieira- Montes Claros, MG).	54
Figura 4.2: Mapa de Aquíferos da área de estudo	55
Figura 4.3: Capacidade específica de teste e produtividade para rebaixamento de 25 m no sistema aquífero cárstico fissural do São Francisco.	57
Figura 5.1: Capacidade específica de teste e produtividade para rebaixamento de 25 m no sistema aquífero cárstico fissural do São Francisco.	64
Figura 5.2: Domínios e subdomínios hidrogeológicos do carste São Francisco	66
Figura 6.1: Superfícies potenciométricas e abordagem adotada. Modificado de Feitosa & Filho (2008).....	74
Figura 6.2: Cargas hidráulicas e pluviometria média mensal por década.	77
Figura 6.3: Superfícies pluviométricas: médias dos totais anuais.	78
Figura 6.4: Superfícies potenciométricas por décadas.....	80

Figura 6.5: Correlação carga hidráulica gerada x carga hidráulica observada.....	81
Figura 6.6: Zoneamento de diferenças de cargas hidráulicas para oito décadas.	82
Figura 6.7: Precipitação por décadas – Barreiras/BA (Fonte: INMET).....	83
Figura 7.1: Mapa de poços de coleta de água	88
Figura 7.2: Balanço iônico primeira campanha	92
Figura 7.3: Balanço iônico segunda campanha.....	92
Figura 7.4: Distribuição dos poços na área regional de Irecê.	94
Figura 7.5: Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período seco na regional de Irecê.....	97
Figura 7.6: - Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período úmido na regional de Irecê.....	98
Figura 7.7: Correlação entre STD e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê	99
Figura 7.8: Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.	100
Figura 7.9: Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.	100
Figura 7.10: Mapa de distribuição dos valores de pH no período seco na regional de Irecê.	102
Figura 7.11: Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê.	103
Figura 7.12: Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê.	105
Figura 7.13: Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período úmido na regional de Irecê.	106
Figura 7.14: Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê.	108
Figura 7.15: Mapa de distribuição dos teores de dureza no período úmido na regional de Irecê.	109
Figura 7.16: Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Irecê. A amostra vermelha corresponde a coleta na Formação Morro do Chapéu.....	111
Figura 7.17: Relação de $\delta^{18}O$ e δ^2H das amostras.	116
Figura 7.18: Distribuição das amostras agrupadas no âmbito da área Regional de São Desidério	119

Figura 7.19: Distribuição dos teores de sólidos totais dissolvidos (STD), período seco na área regional de São Desidério.....	124
Figura 7.20: Correlação entre STD e dureza para as águas do Bambuí aflorante nos períodos seco e úmido.....	125
Figura 7.21: Correlação entre STD e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.....	125
Figura 7.22: Correlação entre STD e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.....	126
Figura 7.23: Correlação entre STD e sulfato para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.....	126
Figura 7.24: Distribuição da dureza, no período seco, na área regional de São Desidério.....	128
Figura 7.25: Correlação entre dureza e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido.....	129
Figura 7.26: Correlação entre dureza e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido.....	129
Figura 7.27: Correlação entre dureza e sulfato para as águas do Bambuí.....	130
Figura 7.28: Correlação entre STD (seco) e STD (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto.....	132
Figura 7.29: Correlação entre dureza (seco) e dureza (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido.....	133
Figura 7.30: Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.....	136
Figura 7.31: Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.....	137
Figura 7.32 A: Diagrama de Piper das amostras coletadas no período úmido, na área regional de São Desidério.....	138
Figura 7.33: Relação de $\delta^{18}O$ e δD para o conjunto total de dados e por compartimento hidrogeológico. RMM=Reta Meteórica Global.....	146
Figura 7.34: Distribuição dos pontos de coleta de poços e águas superficiais na área regional de Montes Claros/MG.....	150
Figura 7.35: Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.....	154
Figura 7.36: Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período chuvoso.....	155

Figura 7.37: Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período seco.....	156
Figura 7.38: Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período úmido.	156
Figura 7.39: - Correlação entre STD e dureza em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	157
Figura 7.40: Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	157
Figura 7.41: Correlação entre STD e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	158
Figura 7.42: Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	158
Figura 7.43: Correlação entre ferro e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	160
Figura 7.44: Correlação entre ferro e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.	161
Figura 7.45: Correlação entre manganês e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	162
Figura 7.46: Correlação entre manganês e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	162
Figura 7.47: Distribuição dos valores de dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.....	164
Figura 7.48: Distribuição dos valores da dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido.	165
Figura 7.49: Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	166
Figura 7.50: Correlação entre dureza e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	166
Figura 7.51: Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.....	167
Figura 7.52: - Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Montes Claros e intervalos STD.....	169
Figura 7.53: Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período seco na área regional de Montes Claros.....	170
Figura 7.54: Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período úmido na área regional de Montes Claros.....	171

Figura 7.55: Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras.	182
Figura 7.56: Distribuição espacial dos isótopos estáveis na área regional de Montes Claros.....	183
Figura 8.1: Poços classificados pelo parâmetro P correlacionados com as unidades de solo.....	192
Figura 8.2: Classificação dos parâmetros de vulnerabilidade para a área geral de estudo.	194
Figura 8.3: Mapa de vulnerabilidade da área geral de estudo	195
Figura 8.4: Distribuição das cargas contaminantes no Domínio IV com classificação POSH.	199
Figura 8.5: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação.....	201

1 Introdução

O presente relatório intitulado Volume II - Hidrogeologia, da “*Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos*” trata da descrição geral da hidrogeologia regional, atualizando os conhecimentos pretéritos e descrevendo as feições características das áreas cársticas, alvo dos trabalhos.

O Capítulo 2 apresenta e discute os conceitos mais relevantes para a compreensão do comportamento das áreas cársticas e fissuro cársticas na bacia do Rio São Francisco. e faz uma revisão da hidrogeologia regional dos Grupos Bambuí e Una, nos estados de Minas Gerais e da Bahia, para firmar as bases sobre as quais será feita a avaliação hidrogeológica das formações cársticas da Bacia do Rio São Francisco.

Na sequência vem a caracterização dos domínios e subdomínios hidrogeológicos, apresentada no Capítulo 3. A individualização dos domínios e subdomínios foi baseada nos diferentes comportamentos hidrogeológicos ditados por características litológicas, estruturais, tectônicas e geomorfológicas distintas.

No Capítulo 4 é apresentado o Mapa de Aquíferos regional e sua descrição. Este documento visa essencialmente ao zoneamento dos diferentes potenciais de produção de água subterrânea na área de estudo.

O Capítulo 5 discute o levantamento de dados de poços no banco SIAGAS e em vários outros bancos estaduais como os bancos das companhias de saneamento da Bahia e de Minas Gerais, por exemplo. Especial atenção é dedicada ao cadastramento de novos poços, bem como ao cadastramento de fontes poluidoras, realizados pelo Consórcio.

O Capítulo 6 é dedicado à análise da evolução decenal das cargas hidráulicas obtidas dos poços SIAGAS. Essa análise evidencia as variações do armazenamento de água subterrânea com o regime de chuvas, confirmando a grande diferença de comportamento entre os meios porosos e os meios cársticos.

No Capítulo 7 apresenta-se a hidrogeoquímica regional, trazendo toda a análise da qualidade das águas nos aquíferos cársticos.

A análise da vulnerabilidade e perigo de contaminação são apresentados no Capítulo 8.

2 Hidrogeologia Regional

São conhecidos no Brasil três grandes escudos Arqueanos denominados de Escudo das Guianas, Escudo Brasil Central e Escudo Atlântico. A este último pertence o Escudo do São Francisco, mais comumente designado de Cráton do São Francisco, cujos limites são mostrados na Figura 2.1(Alkmim *et al.* 1993).

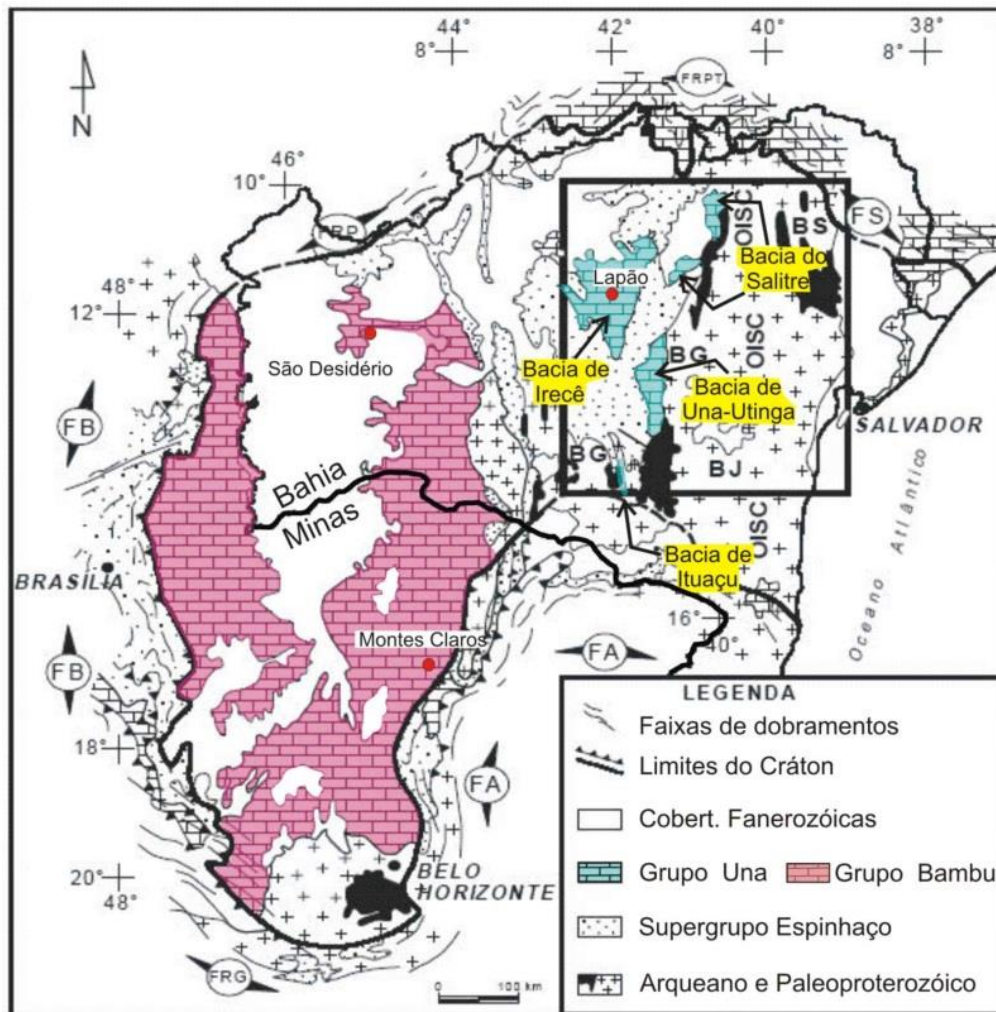


Figura 2.1: O Cráton do São Francisco e os grupos Bambuí e Una (Alkmim et al 1993)

O Cráton do São Francisco abrange, principalmente, os estados da Bahia e de Minas Gerais e os supergrupos Espinhaço e São Francisco. Sob a designação de Supergrupo São Francisco são reunidas todas as sequências deposicionais do Neoproterozoico, principalmente os grupos Macaúbas e Bambuí em Minas Gerais, e Una, na Bahia. Essas unidades recobrem quase todo o segmento centro-sul do Cráton e ocorrem também na região da Chapada Diamantina.

Na região da Chapada Diamantina Oriental, o Supergrupo São Francisco é representado pelo Grupo Una que ocorre nas chamadas bacias de Irecê, Salitre, Una-Utinga e Ituaçu (Guimarães, 1996), numa área total de 16.000 km² (Figueiredo, 2008). Este grupo compreende a Formação Bebedouro, na base, e a Formação Salitre, no topo. As áreas de ocorrência do Grupo Una são mostradas na Figura 2.1. No Grupo Una vem sendo intensiva e extensivamente explorado o chamado Aquífero Salitre que corresponde à zona mais superficial, carbonática, da Formação Salitre.

O Grupo Bambuí, por sua vez, encerra a maior parte dos sedimentos carbonatados Neoproterozoicos que ocorrem segundo uma grande faixa N-S com 900 km de extensão e largura média de 350 km, desde a Faixa de Dobramentos Rio Preto, ao norte, até o escudo arqueano na região de Belo Horizonte (ver Figura 2.1). Essa

faixa, chamada de Bacia do São Francisco por diversos autores, ocupa uma área de 315.000 km², cortada diagonalmente de SSW para NNE pelo Rio São Francisco. Da mesma forma que no Grupo Una, o aquífero mais importante e regionalmente explorado, designado genericamente de Aquífero Bambuí, corresponde à porção mais superior, carstificada, das formações carbonatadas do Grupo Bambuí.

No amplo panorama geológico acima apresentado ocorrem importantes reservatórios de água subterrânea, desenvolvidos principalmente em rochas carbonáticas. Carste é o termo usado para descrever o tipo especial de paisagem que se desenvolve nessas rochas, rico em cavidades e um extenso sistema de circulação de água subterrânea. O Carste clássico refere-se às áreas de ocorrência de calcários, caracterizado pela presença de surgências, sumidouros, paredões, vales cegos, depressões fechadas e lagos associados aos dolinamentos ou às extensas superfícies rebaixadas.

Os diversos condutos subterrâneos e as cavidades desenvolvidas nos maciços rochosos estão em grande parte conectados à superfície, o que permite a existência de fluxos hídricos de velocidade elevada entrando e saindo do substrato rochoso. Além das formas cársticas geradas pela dissolução da rocha, existem também feições construtivas, formadas pela precipitação de carbonato, como as turfas calcárias depositadas por águas saturadas em carbonato de cálcio e os espeleotemas.

A dissolução da rocha carbonática depende da presença de CO₂ na água. O CO₂ é proveniente do contato das águas da chuva com a atmosfera e os ácidos orgânicos presentes nos solos. A água acidificada é capaz de reagir com a rocha, principalmente com o mineral carbonato de cálcio (calcita), liberando íons bicarbonato. Esse fato endossa a importância da existência de solos e matéria orgânica para os processos de carstificação, e indica que os pontos de máxima dissolução ocorrem nos locais onde águas agressivas encontram diretamente a rocha. Existindo um perfil de solo, a dissolução ocorrerá principalmente no contato solo-rocha.

Cabe salientar que um dos principais fenômenos decorrentes, tanto em função das particularidades composicionais das rochas calcáreas (teores > 70% da matriz rochosa em CaCO₃), como pela presença de uma porosidade secundária, é o desenvolvimento potencial de fluxos por condutos, os quais propiciam o aporte das águas subterrâneas de forma mais rápida do que nas porções porosas, desde as zonas de recarga até as fontes de descarga, na forma de nascentes e surgências.

Assim, em terrenos calcários constituídos predominantemente por carbonato de cálcio, ocorre a dissolução pela ação da água, a modificação das formas, o alargamento das zonas porosas primárias e secundárias (juntas e fissuras) nos maciços rochosos e, principalmente, a alteração das suas propriedades hidráulicas. Essas, por sua vez, criam condições diferenciadas para a circulação da água, que percorre o maciço em percursos que conectam condutos formando caminhos difíceis de prever ou mapear. Esses fluxos podem ocorrer em velocidades distintas ao longo dos condutos, em zonas confinadas ou não.

Em contraste a todos os demais sistemas aquíferos, os sistemas constituídos por material carbonático, possuindo o fator de dissolução como diferenciação preponderante, exibem permeabilidade influenciada diretamente pelas formas de alargamento das juntas e planos de acamamento das rochas, na medida em que as águas de circulação removem através da dissolução, o próprio material carbonático. Desse modo, em consideração ao tempo geológico de transformação mineral, o processo de dissolução mostra-se muito mais rápido, acarretando modificações extremamente significativas no sistema de fluxos subterrâneos, em curto espaço de tempo (KLIMCHOUK *et al.* 2001).

O contexto tectônico influencia na dinâmica do sistema cárstico, pois pode impor condições de maior energia sobre a movimentação da água. Durante a implantação, o sistema cárstico registra as características tectônicas dos maciços, tais como o estado de fraturamento e a posição dos níveis de base, assim como suas variações. Após a implantação, a evolução do carste passa gradualmente a registrar as mínimas movimentações que afetam os maciços. Um evento de soerguimento corresponderia a um rebaixamento dos níveis de base e conseqüente escavação de cavidades em níveis inferiores. Eventos de subsidência induzem ao entulhamento dos condutos e/ou escavações de condutos em níveis superiores. Junto com o basculamento de blocos, esses movimentos podem ser responsáveis por importantes variações nas direções de drenagens subterrâneas e superficiais. Portanto, ao longo da história do desenvolvimento do carste, ocorrem distintas zonas carstificadas herdadas de diferentes posicionamentos do nível d'água, de acordo com os períodos de rejuvenescimento e evolução do relevo.

Avançando na questão da dinâmica hídrica de regiões cársticas, deve-se salientar as formas de inter-relação existentes entre as águas subterrâneas e as águas de superfície, dadas as características de fluxos através de surgências e sumidouros. Nesses pontos específicos, a água passa a participar da dinâmica hídrica subterrânea de forma muito mais rápida e concentrada do que nos sistemas não-cársticos.

As formas de infiltração no carste de modo difuso através das zonas de recarga estabelecidas em mantos de alteração do capeamento rochoso, não diferem muito daquelas descritas em ambientes hidrogeológicos não-cársticos. Contudo, a zona epicárstica, como citado em Kogovsek (1981), Gunn (1983), Williams (1983, 1985) e Klimchouk (2000, 2004), representa o elemento de interface entre solo e a rocha, que é normalmente abrupto entre o material rochoso alterado e os produtos de decomposição de porosidade granular. A importância desses fatores em estudos hidrogeológicos é devida à condição de recarga localizada na zona epicárstica, uma vez serem estabelecidas formas de armazenamento temporário ou vadoso, infiltrando-se após encontrarem as fraturas do topo do maciço carbonático.

A bacia do rio São Francisco localiza-se, quase em sua totalidade, dentro da Província São Francisco (ALMEIDA *et al.*, 1977;1981), e os seus limites passam em

alguns pontos pelas províncias Borborema (a norte) e Tocantins (a oeste), uma pequena fração a nordeste da província Parnaíba.

O rio São Francisco e seus afluentes são bastante influenciados pelas características geológicas e estruturais do cráton São Francisco e das faixas dobradas que o delimitam, que ocupam principalmente a província São Francisco, e porções menores das províncias vizinhas. No cráton homônimo o rio São Francisco atravessa os domínios morfotectônicos da Bacia do São Francisco, Aulacógeno Paramirim e a bacia do Recôncavo-Tucano-Jatobá, além de faixas aflorantes do embasamento, especialmente na porção centro leste da Bahia. Tal estruturação geológica impõe um importante controle na dinâmica de fluxos superficial e subterrâneo, cujo comportamento encontra-se totalmente condicionado à história evolutiva dos terrenos e dos processos responsáveis pela modelagem do relevo, pela composição e organização dos mantos pedológicos e distribuição espacial das principais estruturas impressas nas diversas litologias presentes.

A Bacia do São Francisco está localizada na porção sul do cráton do São Francisco (em Minas Gerais e no oeste da Bahia), e constitui um conjunto rochoso de espessura média aflorante de 900 m e máxima de cerca de 5.000 m (Alkmim & Martins-Neto, 2001). Essas rochas estão organizadas em quatro unidades litoestratigráficas maiores: o Supergrupo Espinhaço de idade paleo/mesoproterozoica, o Supergrupo São Francisco de idade neoproterozoica, os sedimentos paleozoicos do Grupo Santa Fé e as unidades cretáceas dos Grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia (Alkmim & Martins-Neto, 2001). Além dessas, no domínio de ocorrência da Bacia do São Francisco ocorrem áreas de coberturas cenozoicas, especialmente os depósitos eluvio-coluvionares e os aluviões.

No domínio morfotectônico do Aulacógeno Paramirim, na porção central da Bahia, afloram unidades do embasamento de idade arqueana a paleoproterozóica, intrusivas do Complexo Lagoa Real, o Supergrupo Espinhaço e o Supergrupo São Francisco.

Na porção centro-leste da Bahia e sul de Pernambuco estão localizadas as bacias sedimentares do Recôncavo, Tucano e Jatobá, que se desenvolveram durante a abertura do oceano atlântico Sul, durante o Cretáceo inferior, em um sistema de riftes.

Afloram ainda ao longo da bacia hidrográfica do São Francisco um grande número de unidades geológicas que compõem as faixas dobradas marginais ao cráton do São Francisco, bacias muito antigas arqueanas a paleoproterozóicas e conjuntos ígneos intrusivos e vulcânicos. Ocorrem ainda coberturas sedimentares pós-cretáceas, dentre as quais se destaca a Formação Barreiras (Neogeno). Ao longo do texto, serão ressaltadas dentro dessa variedade de unidades geológicas aquelas que marcadamente apresentam importância para o entendimento da dinâmica hídrica na bacia. A Figura 2.2 apresenta um mapa das principais litologias que

compõem a bacia do rio São Francisco, nos domínios de interesse, ressaltando os tipos de rochas e as idades.

De forma geral, as distintas litologias que conformam o espaço geográfico da bacia do rio São Francisco podem ser classificadas quanto ao tipo de porosidade em quatro grandes unidades que chamaremos de unidades hidrogeológicas de fluxo: granular, fissural, cárstica e fissuro-cárstica.

Unidade granular: formada por rochas capazes de armazenar e transmitir água por meio dos vazios entre os grãos originados durante o processo de formação do depósito sedimentar inconsolidado ou da rocha sedimentar. Reúne principalmente rochas cenozoicas (coberturas detríticas indiferenciadas e a Formação Barreiras), rochas da bacia fanerozoica do Recôncavo-Tucano, e os depósitos sedimentares do cretáceo (Grupos Areado e Uruçuia).

Unidade fissural: reúne tipos rochosos cuja permeabilidade e porosidade dependem, sobretudo, das descontinuidades neles desenvolvidas, ou seja, fissuras, fraturas e falhas. O armazenamento e fluxo da água ocorrem nas estruturas onde houve perda de coesão, já que a porosidade primária tende a ser extremamente reduzida nessas rochas. Dentro da bacia do rio São Francisco muitas formações se comportam como aquíferos fissurais, sendo constituídas principalmente de rochas ígneas e metamórficas pertencentes ao Arqueano, aos cinturões de dobramento e corpos plutônicos intrusivos do Paleoproterozoico. Rochas metassedimentares não carbonáticas posicionadas ao longo das faixas de dobramento, coberturas cratônicas neoproterozoicas parcialmente deformadas e rochas vulcânicas cretáceas, também são incluídas nessa unidade.

Unidade cárstica: caracteriza os maciços rochosos constituídos por rochas sedimentares químicas cuja porosidade evoluiu por dissolução graças à circulação da água em vazios pré-existentes. Destacam-se nessa unidade as rochas carbonáticas, onde são formados condutos, fendas e cavidades. Na bacia do rio São Francisco tais rochas ocorrem principalmente como coberturas cratônicas neoproterozoicas (formações dos grupos Bambuí e Una) e de forma mais restrita na Faixa de dobramento Brasília, onde afloram rochas carbonáticas meso-a-neoproterozoicas (Grupo Vazante).

Unidade fissuro-cárstica: define um conjunto de rochas sedimentares que encerram rochas carbonáticas alternadas com camadas de rochas siliciclásticas, onde a água flui em um sistema de condutos interconectados gerados por dissolução (porosidade cárstica) e planos de descontinuidade típicos dos sistemas de porosidade fissural. Representam esse sistema principalmente formações geológicas de protólito sedimentar depositadas durante o Neoproterozoico e Paleoproterozoico, ao longo do

cráton ou nas faixas de dobramentos marginais. Os grupos Bambuí, Una e Vazante englobam algumas formações que podem ser caracterizadas como sistemas de porosidade fissuro-cárstica.

Em geral, os sistemas porosos e cársticos são os sistemas mais promissores para aproveitamento da água subterrânea, já que ocorrem em terrenos onde a água da chuva pode infiltrar e ser armazenada, fluindo com velocidade mais elevada ao longo do maciço rochoso, participando dos processos de recarga dos sistemas fluviais e dos grandes corpos aquíferos em profundidade.

Entretanto, apesar dos distintos tipos de porosidade, os maciços rochosos podem ter potencialidade hídrica equivalentes, dependendo do volume e interconexão dos seus variados poros. Nesse sentido, torna-se interessante agrupar os materiais litológicos em domínios hidrogeológicos homogêneos: Zonas Aquíferas (ZA), Zonas Não-Aquíferas (ZNA) e Zonas de Aquíferos Pobres (ZAP), os quais mantêm relação direta com a porosidade efetiva para fluxos de um determinado tipo litológico, servindo como excelente índice-guia acerca dos potenciais hidrogeológico e de interconexão dos sistemas aquíferos entre bacias hidrográficas contíguas.

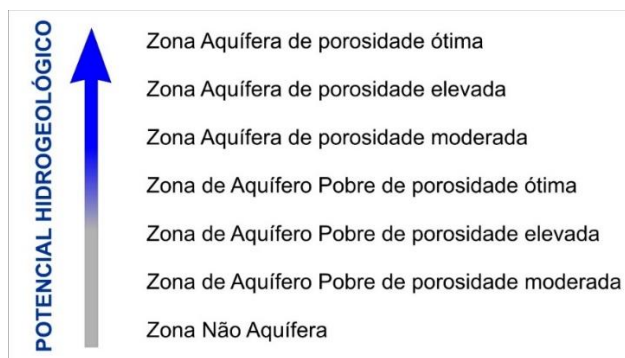
A porosidade efetiva para fluxo determina a quantidade percentual de poros interconectados que estariam disponíveis para armazenamento e circulação de água, sendo este parâmetro um dos mais importantes indicadores das potencialidades hidrogeológicas.

Os diversos tipos de rochas existentes, com cerca de centenas de associações possíveis, podem ser assim agrupadas e classificadas de acordo com intervalos admissíveis, facilitando a identificação dos domínios homogêneos quanto ao seu potencial hidrogeológico, o que satisfaz o entendimento acerca da espacialização dos atributos de maior interesse ao conhecimento das aptidões dos aquíferos quanto a recarga, condutividade hidráulica e transmissividade de um dado sistema.

A existência desse arranjo hidrogeológico implica em uma modalidade de correlação entre os componentes superficial e subterrâneo, onde o comportamento sazonal dos volumes escoados nos períodos de estiagem ajusta-se a um padrão típico de esgotamento, caracterizando-se assim, domínios homogêneos quanto às tipologias aquíferas existentes e seu reflexo nas formas específicas em que se manifestam os hidrogramas de escoamento superficial.

Dessa maneira, os terrenos pouco permeáveis e de baixa capacidade de armazenamento (Zonas Não-Aquíferas) mostram-se caracterizados por bacias em que a recessão se encontra vinculada à restituição de aquíferos pouco profundos ou inconsolidados, onde o regime de fluxos é intermitente. Já os terrenos compostos por rochas maciças fissuradas, porosas com elevada capacidade de armazenamento ou cársticas, correspondem a regimes de escoamento permanente, pouco influenciado pelas alternâncias pluviométricas e relativamente constantes no período de estiagem (Zonas Aquíferas). Aqueles terrenos onde as propriedades hidráulicas do meio aquífero correspondem a uma situação intermediária em termos

de sua capacidade de armazenamento são relacionados às Zonas de Aquíferos Pobres, e aqui vinculados a regimes de escoamento de base que são mantidos nos períodos de estiagem, ainda que os volumes se mostrem reduzidos.



A Figura 2.3 mostra a divisão em tipologias aquíferas para as rochas no domínio de estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissurais. As três tipologias aquíferas, tendo em vista a porosidade efetiva para fluxo de cada tipo litológico, foram subdivididas, criando assim sete tipologias aquíferas de potencial hidrogeológico crescente:

A paisagem evoluiu a partir desse arcabouço rochoso estruturado em um passado remoto, estando a constituição física global refletida através das propriedades intrínsecas de cada material integrante e dos mecanismos diferenciados de atuação dos agentes morfoclimáticos, quanto ao desenvolvimento e elaboração das feições e formas de relevo predominantes.

No alto curso, o rio nasce da convergência das drenagens formadas no contato do cráton do São Francisco com o extremo sul da faixa Brasília, no segmento sul do compartimento oeste definido por Alkmin & Martins-Neto (2001) na bacia do São Francisco (Figura 2.3). Nessa área, as coberturas neoproterozoicas do Grupo São Francisco acomodaram a deformação das frentes de empurrão da faixa Brasília gerando dobras em todas as escalas, falhas de empurrão e falhas transcorrentes.

Dobras e falhas orientam-se preferencialmente, segundo NNE-SSW e vergem para leste, e no extremo sul as estruturas dominantes compõem um feixe de falhas transcorrentes sinistrais de N60°W. Conforme descrito por Alkmin e Martins-Neto (2001), esses feixes estão enraizados na faixa Brasília, onde estão os terrenos topograficamente mais elevados, e estendem-se para além do limite da bacia, afetando o embasamento.

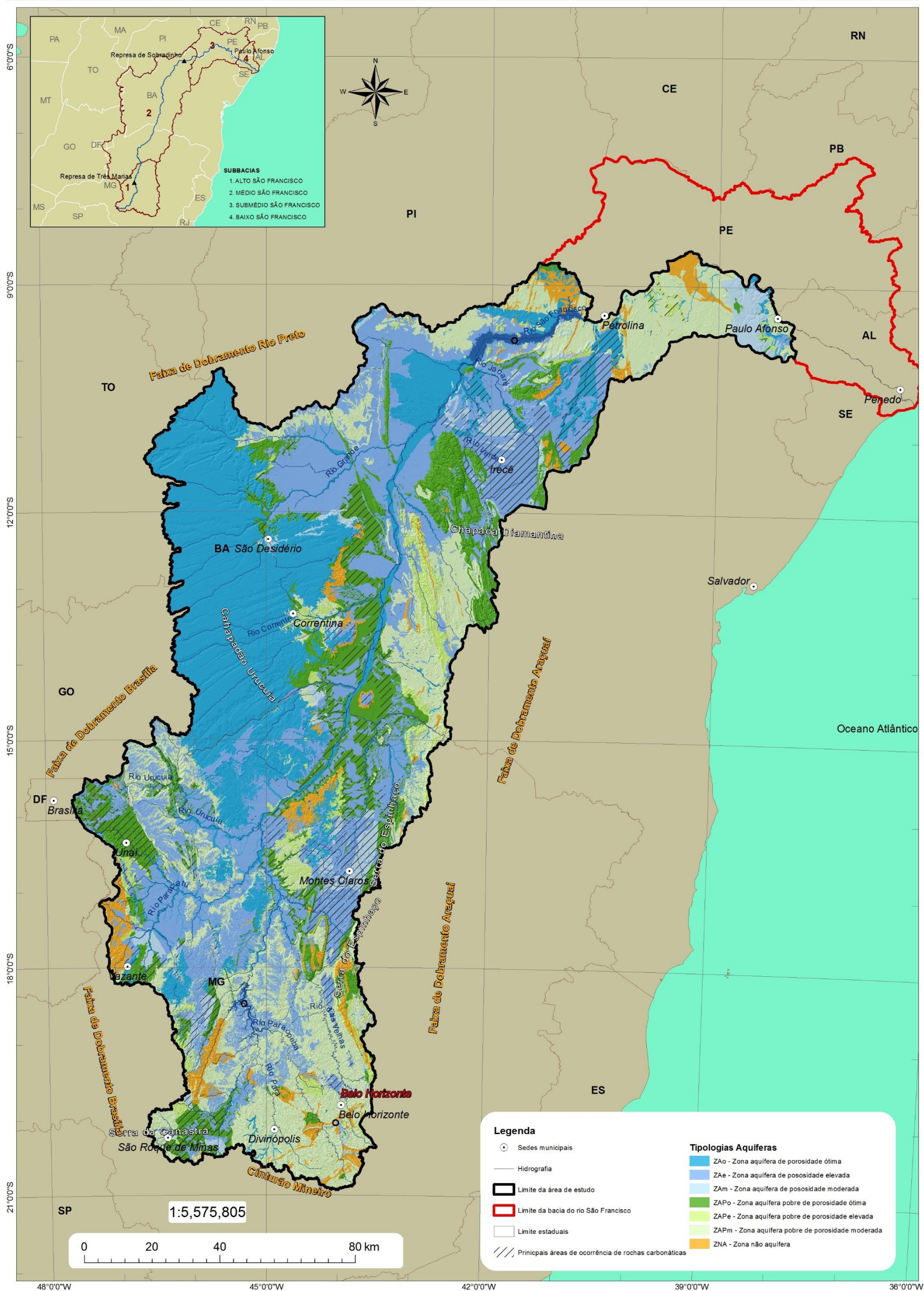


Figura 2.3: Tipologias aquíferas na área de interesse ao estudo dos sistemas hidrogeológicos cársticos e cárstico-fissural na bacia do rio São Francisco (CPRM 2003)

Desse modo, nesse ambiente de maciços elevados e estruturalmente conturbados, marcados por descontinuidades profundas é onde está posicionada a nascente do rio São Francisco (município de São Roque de Minas) e seus principais afluentes do alto curso na margem esquerda. As drenagens (rio Samburá, rio Bambuí e rio São Mateus) são marcadamente NW-SE e W-E, e são localmente paralelas a traços de falhas transcorrentes e fraturas perpendiculares ou oblíquas as frentes de empurrão.

Nesse contexto específico destacam-se o Grupo Bambuí, de porosidade cárstica e cárstica-fissural, unidade cratônica neoproterozoica do Supergrupo São Francisco, e os Grupos Canastra, Araxá, Ibiá, cuja porosidade é essencialmente fissural, localizados na faixa de dobramento Brasília. Esse conjunto configura Zonas Aquíferas sotopostas por Zonas de Aquíferos Pobres. Pela constituição litológica das rochas, esse arranjo estrutural e morfológico, o ambiente hidrogeológico dessa zona específica da bacia marca uma condição de forte interação entre essas Zonas Aquíferas, que estão dentro da área de maior aporte pluviométrico da bacia do rio São Francisco, indicando um aumento de sua capacidade de produção de água.

Para norte, dentro do Compartimento Oeste da bacia do São Francisco, até a altura da represa Três Marias predominam no interior do cráton dobramentos e falhas de empurrão paralelos às frentes de cavalgamento da faixa Brasília. Sobre as rochas neoproterozoicas do grupo Bambuí marcadas por essas estruturas, estão coberturas sedimentares cretáceas do Grupo Areado, rochas vulcanossedimentares do Grupo Mata da Corda e coberturas cenozoicas, também muito importantes para a estruturação das redes de drenagens que conformam os afluentes do rio São Francisco nessa porção, que seguem marcadamente a direção SW-NE.

Esse conjunto define Zonas Aquíferas (rochas carbonáticas do Grupo Bambuí) em contato lateral ou de topo com zonas não aquíferas (onde predomina os pelitos da Serra da Saudade e Serra de Santa Helena). Ambas são parcialmente cobertas por Zonas de Aquíferos Pobres materializadas, pelas rochas da Formação Três Marias ou rochas vulcanossedimentares do Grupo Mata da Corda ou Zonas Aquíferas, constituídas pelos litotipos do Grupo Areado e as coberturas cenozoicas.

Prosseguindo ainda na direção norte, na margem esquerda do rio São Francisco, continua perceptível pelos lineamentos de relevo e estruturas mapeadas no Grupo Bambuí a deformação causada pela interação com a Faixa Brasília. Nessa área estão as bacias dos rios Paracatu e Urucuia, onde se destaca a direção aproximadamente NW-SE dos afluentes e da própria calha do rio Urucuia, correndo na direção paralela às falhas de empurrão e eixos de dobramentos.

Destaca-se também a presença de áreas de cobertura cenozoica extensas marcando uma grande Zona Aquífera, que reúne os principais litotipos pelos quais as águas superficiais da bacia Urucuia e Paracatu fluem em seu médio e baixo curso. As áreas elevadas nessas bacias, que constituem as zonas de recarga potenciais são constituídas por rochas pré-cambrianas – O Grupo Bambuí, Grupo Canastra, e as rochas da Faixa Vazante-Paracatu (posicionadas na porção externa da Faixa de Dobramentos Brasília). As unidades do Grupo Bambuí, subgrupo Paraopeba, foram classificadas como Zonas de Aquíferos Pobres, assim como as unidades do Grupo Vazante. Já as rochas da Formação Paracatu (filito carbonoso e metassiltito), pertencente ao Grupo Canastra, foram classificadas como Zonas Não Aquíferas.

Na margem direita, partindo de sul para norte, também se observa a influência marcante das condições lito-estruturais no desenvolvimento da rede de drenagem. Os principais tributários, o rio Pará, Paraopeba e rio das Velhas, seguem paralelamente na direção SE-NW, até a foz no rio São Francisco. Tais rios têm suas cabeceiras posicionadas nos terrenos elevados no limite sul da bacia do rio São Francisco. Esse limite corresponde às cumeadas das serras e morros residuais esculpidos sobre um domínio cristalino onde predominam terrenos granito-greenstone arqueanos, domos de TTG e cinturões paleoproterozoicos. Dentre eles destacam-se as rochas ígneas intrusivas do Cinturão Mineiro, Complexos ortognáissicos Divinópolis e Belo Horizonte, e as rochas meta-vulcanossedimentares e metassedimentares dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas. Essas rochas compõem Zonas de Aquíferos Pobres e localmente Zonas Não-Aquíferas. Destacam-se, entretanto, alguns litotipos do Supergrupo Minas (itabiritos, dolomitos, formações ferríferas e quartzitos) que afloram no Quadrilátero Ferrífero e que funcionam como Zonas Aquíferas de grande importância para a descarga hídrica na cabeceira do rio das Velhas.

Nessa porção da bacia, e seguindo em direção a norte ao longo das sub-bacias desses grandes rios, o embasamento se aprofunda e as drenagens passam a percorrer trechos dentro da cobertura cratônica, especialmente nas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí. Nessas rochas estão impressas estruturas de acomodação da deformação ocasionada pelo desenvolvimento da Faixa de dobramentos Araçuaí, na margem leste do cráton do São Francisco. Na Faixa Araçuaí se destaca fisiograficamente as cumeeiras aproximadamente NS da Serra do Espinhaço, que demarcam grande parte do limite leste da bacia do rio São Francisco. É interessante notar, que o traçado dos rios Pará, Paraopeba e das Velhas seguem paralelamente a direção do lineamento de relevo formado pela inflexão sul NW-SE da Serra do Espinhaço.

Os rios Pará, Paraopeba e das Velhas em seu médio e baixo curso atravessam o Grupo Bambuí no Compartimento E da bacia do São Francisco definido por Alkmin e Martins-Neto (2001). Nesse compartimento as rochas estão marcadas por falhas de empurrão, dobras em duplexes, leques imbricados, raras falhas direcionais e um persistente sistema de juntas NE/SW e NW/SE. Os dobramentos, bem como os sistemas de duplexes, têm polaridade contrária a da faixa Brasília, com transporte tectônico de leste para oeste. Sobre essas rochas ocorrem apenas depósitos inconsolidados cenozoicos.

As Zonas Aquíferas de destaque ao longo da bacia do rio Pará, Paraopeba e Velhas são as Formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) e as coberturas detrito-lateríticas.

Apesar da variedade de estruturas decorrentes da interação entre a margem leste do cráton e a Faixa Araçuaí, as condições de interconexão hidráulica subterrânea entre os dois conjuntos parecem ser menos eficientes quando comparado às condições da margem oeste do cráton e na interação desta com o extremo sul da Faixa Brasília. Além de um regime mais escasso de chuvas nessa altura da bacia na margem leste, o volume dos sistemas fluviais parece também ser mais reduzido devido a um menor aporte de água subterrânea das cabeceiras, que no caso são as áreas topograficamente mais elevadas da Serra do Espinhaço. Possivelmente, as estruturas como falhas de empurrão, duplexes e o próprio caimento das camadas com ângulo mais alto, mergulhando para leste, podem conduzir parte das parcelas

infiltradas nos maciços para fora da bacia, seguindo as discontinuidades materializadas por esses grandes planos estruturais.

Ao norte, em contexto geológico semelhante na margem direita do rio São Francisco, os rios Verde Grande e Gorutuba atravessam o Grupo Bambuí em uma área mais árida e plana, apresentando trechos intermitentes orientados segundo a direção sul-norte, aproximadamente paralelos a direção das linhas de falha que marcam o contato com as frentes de cavalgamento na margem leste do cráton. Esses rios correm em um gradiente topográfico muito baixo, e estão muito próximos à cota altimétrica do rio São Francisco.

Especialmente a leste do rio Verde Grande, as rochas do Grupo Bambuí estão pouco a não deformadas, e são parcialmente recobertas por unidades arenosas cretáceas, formando topos residuais sobre as pilhas de sedimentos predominantemente pelito-carbonáticos do próprio Grupo Bambuí.

Nos terrenos arrasados essas unidades pelito-carbonáticas foram mapeadas como subgrupo Paraoapeba indiviso e compõem uma Zona de Aquíferos Pobres. Em mapeamento de maior detalhe, identifica-se uma grande área cárstica aplainada parcialmente sotoposta a um espesso manto de coberturas detrito-lateríticas que apresenta características de Zonas Aquíferas. Entretanto, a recarga vertical nessa área é baixa devido às condições climáticas. No entanto, dada a presença de peculiaridades hidrogeológicas que merecem destaque e que justificam a alta produtividade de alguns poços perfurados na região, essa área será discutida posteriormente.

Seguindo para norte, já no estado da Bahia, o ambiente ainda mais árido e mais plano reduz mais o aporte de água dos tributários da margem direita do rio São Francisco. Ao norte da confluência do rio Verde Grande com o rio São Francisco até a altura da confluência do rio Grande a diferença entre a contribuição fluvial da margem esquerda e a margem direita é marcante. A vasta distribuição em área e a espessura significativa dos arenitos cretáceos do Grupo Urucuia na margem esquerda, na porção oeste da Bahia, define uma área hidrogeologicamente peculiar – o Sistema Aquífero Urucuia.

Os vastos depósitos de areia do Grupo Urucuia permitem uma taxa elevada de recarga pela infiltração das águas precipitadas ao longo do Chapadão Urucuia, e essa recarga se manifesta na vazão elevada de muito dos afluentes do São Francisco, como os rios Carinhanha, rio Corrente e o próprio rio Grande. As drenagens no Chapadão Urucuia destacam-se em mapa pelo padrão paralelo encaixados em discontinuidades de direção WSW-ENE.

Conforme descrevem Gaspar *et al.* (2012), na região compreendida entre as cidades de São Domingos (GO) e Correntina (BA), as rochas do Grupo Urucuia estão em parte em contato direto com o embasamento cristalino (Zona de Aquíferos Pobres), o que indica a ausência das coberturas neoproterozoicas nessa região. Na região de Santa Maria da Vitória, Correntina e Jaborandi, o embasamento é composto por gnaisses migmatíticos, granitoides e sienitoides (Complexo Gnáissico-Migmatítico de Correntina e Suíte Intrusiva Correntina), que ocorrem em janelas de erosão dos rios Arrojado, Correntina, Formoso e afluentes.

Na região entre as cidades de Barreiro e São Desidério, ao norte, já na bacia do rio Grande, abaixo das rochas arenosas do Grupo Urucuia afloram as coberturas

neoproterozoicas do Grupo Bambuí, em um contexto geotectônico-estrutural diferenciado, já na porção noroeste do cráton do São Francisco próximo ao contato com a faixa de dobramento Rio Preto. Nessa porção, o Grupo Bambuí apesar de estar dentro da área cratônica, apresenta influência da orogênese brasileira responsável pela inversão da bacia Rio Preto, a norte.

No interior cratônico, próximo à cidade de São Desidério, as camadas estão horizontalizadas, com dobras amplas regionais, localmente com mergulho mais elevado. A deformação modifica bastante na medida em que se aproxima das zonas de cisalhamento e falhas inversas de dupla-vergência que caracterizam a faixa Rio Preto. O embasamento, assim como as coberturas neoproterozoicas se aprofundam para norte, até que na superfície passam aflorar de fato as rochas da faixa Rio Preto (UHLEIN *et al.*, 2011).

Saindo do oeste da Bahia e seguindo as drenagens até a calha do rio São Francisco, há uma grande zona de acumulo de depósitos do neógeno-quadernário, de composição detrítico-laterítica e depósitos eólicos continentais onde predominam sedimentos arenosos, no contexto geomorfológico da planície do São Francisco. Esses depósitos ocupam uma grande área até a represa de Sobradinho, formando uma zona aquífera granular vasta na margem esquerda do rio.

Na porção central da Bahia, o Cráton do São Francisco é truncado por estruturas que marcam a superimposição de dois *rifts* parcialmente invertidos de idade paleoproterozoicas e neoproterozoica – o Aulacógeno Paramirim (PEDROSA SOARES, 2001 e CRUZ E ALKMIN, 2006). O Aulacógeno Paramirim engloba a porção norte da Serra do Espinhaço, o vale do rio Paramirim e parte do vale do rio São Francisco e também a Chapada Diamantina. Nesse grande domínio, encontram-se aflorantes rochas do Supergrupos Espinhaço e do Supergrupo São Francisco. As rochas associadas ao aulacógeno estão hoje parcialmente alçadas na topografia e concentram cabeceiras de alguns dos afluentes da margem direita do rio São Francisco na porção central da Bahia.

Uma parte substancial do aulacógeno Paramirim, especialmente a porção próxima as fronteiras do cráton, mostram o efeito da tectônica de inversão (CRUZ & ALKMIN, 2006), entretanto a área de máxima concentração dessa deformação define uma zona de aproximadamente 200 km de largura que atravessa o cráton na direção NNW, que foi denominada corredor de deformação do Paramirim (ALKMIN *et al.*, 1993).

A direita desse corredor localiza-se a Chapada Diamantina, o planalto cárstico de Irecê e o vale do rio Salitre. Esse conjunto é a expressão fisiográfica de um sistema de dobras e falhas que expõem em grandes anticlinais e sinclinais as coberturas neoproterozoicas do Supergrupo São Francisco, principalmente o Grupo Una, e as coberturas paleo-mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço, na base (Grupo Espinhaço, Grupo Paraguaçu e Grupo Chapada Diamantina).

Em trechos deprimidos do relevo, encontram-se coberturas neógenas-quadernárias de composição detrítico-lateríticas e ainda zonas cobertas por brechas calcíferas e calcete. Esses litotipos carbonáticos foram, a princípio, interpretados como unidades palustres terciárias ou do Pleistoceno superior associados com fácies ainda mais recentes originadas entre o Último Máximo Glacial e o Holoceno (AULER *et al.*, 2003).

É nesse contexto geológico que se desenvolvem as drenagens dos rios intermitentes Jacaré, Verde e Salitre, na zona climática do semiárido baiano.

A leste do Aulacógeno Paramirim, o rio São Francisco e seus afluentes da margem direita atravessam uma grande extensão de maciços rochosos desenvolvidos em terrenos granito-*greenstone* arqueanos e domos de TTG, terrenos neoarqueanos e cinturões paleoproterozoicos, dispostos em direção norte-sul no domínio litoestrutural Bahia Oriental. Os sistemas de drenagem principal dos afluentes do rio São Francisco nessa porção de sua margem direita estão encaixados ao longo das descontinuidades marcadas pelos contatos geológicos e as zonas de cavalgamento nesse vasto terreno predominantemente cristalino e que foram classificados como Zonas de Aquíferos Pobres.

Já na porção do Sub-médio e Baixo São Francisco os afluentes do rio atravessam a zona de contato entre a Província São Francisco e Borborema (principalmente na margem esquerda). Atravessam parcialmente as unidades geológicas pertencentes ao orógeno mesoproterozoico Cariris Velhos, orógenos neoproterozoicos (Faixa Sergipana, Terreno Pernambuco-Alagoas, Terreno Carindé-Marranicó) e a bacia sedimentar fanerozoica do Recôncavo-Tucano.

Próximo a foz do rio São Francisco destacam-se os depósitos cenozoicos, que incluem principalmente depósitos néogenos e holocênicos. Grande parte desse material pertence ao Grupo Barreiras (idade neógena), que aflora quase ininterruptamente por alguns milhares de quilômetros ao longo da costa do Brasil. A Formação Barreiras (que reúne arenitos, conglomerados e argilitos) define um relevo de tabuleiros, formados pela elevação do interior continental e abaixamento da costa, em resposta a queda eustática do mar e o soerguimento epirogenético do pós-pleiocênico.

Além disso, próximo a foz do rio São Francisco ocorrem depósitos litorâneos indiferenciados recentes, incluindo areias com conchas marinhas, argila e silte ricos em matéria orgânica e dunas de areias finas bem selecionadas.

Dentre esse grande volume de rochas, de um ponto de vista regional, as rochas mais destacadas quanto ao potencial de armazenamento são aquelas que compõem os sistemas de porosidade granular (coberturas cenozoicas inconsolidadas e rochas sedimentares das bacias fanerozoicas) e aquelas de porosidade cárstica e cárstica fissural, representada principalmente pelas coberturas cratônicas neoproterozoicas carbonáticas – Grupo Bambuí e Una.

Diante do arranjo geotectônico e geomorfológico que é exibido na região de estudo, observa-se que os compartimentos mais importantes para a circulação subterrânea em condições de grande integração com os sistemas fluviais encontram-se atrelados, grosso modo, ao alto e médio curso da bacia do rio São Francisco. Parte desses domínios já foi considerada em abordagens acerca da hidrogeologia dos sistemas aquíferos do Estado de Minas Gerais (SOUZA, 1995), onde importantes levantamentos pertinentes ao cômputo específico das disponibilidades hídricas nesses ambientes foram registrados.

Em princípio, pode-se crer que não existe na natureza uma rocha ou maciço rochoso que seja totalmente impermeável, infinitamente, embora em escala local e sob um enfoque de curto espaço de tempo, o caráter composicional de uma determinada rocha pode evidenciar a existência de baixíssimas condutividades hidráulicas.

Contudo, em se tratando de fluxo de água em uma escala regional, onde estão envolvidos fatores diversos, tais como atividade tectônica e a própria ação biológica ao longo do tempo, em extensas e distintas massas rochosas, não é possível se admitir que a água não encontre um caminho a ser percorrido, num maior ou menor espaço de tempo. Existindo gradiente hidráulico potencial, a água buscará uma forma de se deslocar.

Desse modo, observando-se a existência de uma infinidade de tipos de rochas coexistindo sobre grandes extensões continentais, torna-se plenamente aceitável admitir que a dinâmica de fluxos subterrâneos possa ser comandada pelos atributos intrínsecos desses maciços rochosos, sem, contudo, estar vinculada à presença de fatores limitadores, relacionados a divisores topográficos de bacias hidrográficas, embora estes sejam fundamentais no cômputo das parcelas relativas ao escoamento superficial em um dado domínio.

Entende-se que uma ênfase maior deve ser dada acerca das condições de interconexão hidráulica dos sistemas aquíferos, não mais se levando em consideração a continuidade dos maciços conformados por um mesmo tipo de rocha, mas, sim, a existência de uma massa rochosa contínua capaz de armazenar e circular água por grandes extensões, ainda que em condições de trânsito diferenciadas.

Desse modo, afora as características específicas dos tipos litológicos que os individualizam e os diferenciam diante de suas potencialidades hidrogeológicas intrínsecas, as estruturas tectônicas impressas nesses maciços ao longo de sua evolução geológica (falhas e fraturas), são consideradas como entes capazes de funcionar como elos de conexão entre distintos ambientes e tipos de materiais, sob variadas taxas de trânsito, simultaneamente.

Os mecanismos de controle estão fundamentados nas próprias condições que servem para a montagem do arcabouço geológico-geotectônico de um dado domínio, o que, no caso da bacia do rio São Francisco remete à observação de todo o contexto físico e geométrico de abrangência dos espaços que a configuram, não somente as porções interiores ao polígono demarcado naturalmente pelas cumeadas que contornam e fixam os limites de sua bacia hidrográfica, mas, além disso, todos os outros domínios exteriores que se encontram adjacentes e materializam maciços rochosos, contínuos ou não.

O carste pode ser tratado como um sistema composto por três domínios. O primeiro corresponde ao domínio superficial, o exocarste, marcado por formas na superfície desenvolvidas por meio do ataque químico de águas meteóricas, como polijés, uvalas, dolinas, simas, paredões e vales. O segundo corresponde às estruturas no interior dos maciços, o carste subterrâneo ou endocarste, representado pelas cavidades e sistemas de condutos gerados pela dissolução pelo contato com águas de diferentes origens. Entre eles, um terceiro domínio pode ser estabelecido, o epicarste, representando a zona logo abaixo da superfície que engloba o contato irregular entre o solo e o topo da rocha calcária.

Dentro da BSF as grandes unidades portadoras de calcários e dolomitos são as coberturas neoproterozoicas cratônicas, depositadas em ambientes marinhos rasos que ocupavam grandes áreas continentais pretéritas. A evolução do relevo sobre esses maciços hoje caracteriza um conjunto de feições exocársticas e endocársticas

que ainda hoje são pouco conhecidas, apesar do avanço dos estudos espeleológicos na vastidão desses terrenos na BSF nas últimas décadas.

Karmann & Sanchez (1979) propuseram uma classificação das províncias espeleológicas no Brasil definindo quatro províncias: Província Una, Província Bambuí, Província Vale do Ribeira e Província Bodoquema. Na bacia do rio São Francisco ocorrem as províncias Bambuí e Una. Classificações mais recentes foram propostas por Auler, Rubbioli e Brandi (2001) e por CECAV (2009), culminando hoje em 19 regiões cársticas, incluindo zonas cársticas em rochas não carbonáticas.

A Província do Grupo Bambuí (KARMANN & SANCHEZ, 1979) foi subdividida em vários distritos, dentre os quais se pode destacar: São Domingos, Formosa, Distrito Vazante-Paracatu, Montes Claros, Cordisburgo, Lagoa Santa e Arcos-Pains. As diferentes províncias cársticas do Grupo Bambuí tem em comum o fato de estarem distribuídas em clima úmido, em condições de morfogênese tropical caracterizada por intenso processo de dissolução (CARVALHO JUNIOR et al., 2008).

A Província do Grupo Una, além de suas diferenças geológico-estruturais, encontra-se na região semiárida do Brasil. Em razão da baixa pluviosidade, as taxas de dissolução tendem a ser bem mais reduzidas. Entretanto, conforme apontam os estudos de Auler & Smart (2003), existem muitas evidências de alteração hipogênica no desenvolvimento das cavidades aí cadastradas.

As unidades litoestratigráficas portadoras de carbonatos nessas províncias são representadas pelas formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré e localmente Serra da Saudade, pertencentes ao Grupo Bambuí, e a Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una, nas bacias de Irecê e Una-Utinga. Além dessas destaca-se o Grupo Vazante, localizado no extremo oeste da bacia dentro do contexto da Faixa Brasília, que também foi agrupado na Província espeleológica Bambuí.

As rochas carbonáticas pertencentes a Formação Caatinga (de idade cenozoica) apesar de ter área expressiva a norte do planalto cárstico de Irecê e no vale do rio Salitre, são ainda pouco estudadas e não tem grande destaque dentro do cenário espeleológico brasileiro. Essa unidade, dada a espessura restrita não tem a pujança como sistema aquífero cárstico, como as demais unidades destacadas acima.

O edifício estratigráfico formado pelas coberturas carbonáticas do Paleozoico a Neoproterozoico, é marcado por uma intercalação de calcários, dolomitos, margas, siltitos e folhelhos, e registra ciclos sedimentares originados das oscilações do nível do mar, aumento do espaço de sedimentação e aporte de sedimentos nas paleobacias de mares epicontinentais. Esses controles de sedimentação atuaram de forma diferente ao longo do tempo e espaço, dependendo das variações climáticas e da distribuição das tensões ao longo do período orogênico Brasileiro, que afetou diferencialmente o contexto geológico de tais unidades.

Essas características definem as propriedades hidráulicas próprias dos conjuntos rochosos, que, trabalhadas ao longo do tempo geológico, permitiram o desenvolvimento de diferentes padrões de carstificação. Esses diferentes padrões, ao longo dos distintos compartimentos climáticos, geotectônicos e geomorfológicos ganham significados distintos na dinâmica hídrica da BSF.

2.1 O Sistema Aquífero Bambuí

O Sistema Aquífero Bambuí ocorre, principalmente, na vasta região oeste da Bahia e oeste e norte de Minas Gerais, e compreende um aquífero cárstico, de extensão regional, heterogêneo e anisotrópico.

No oeste da Bahia, na região de São Desidério, o Grupo Bambuí é recoberto por sedimentos arenosos do Grupo Urucuia. A Figura 2.4 apresenta um corte geológico regional esquemático, com comportamento do Grupo Bambuí no oeste baiano.

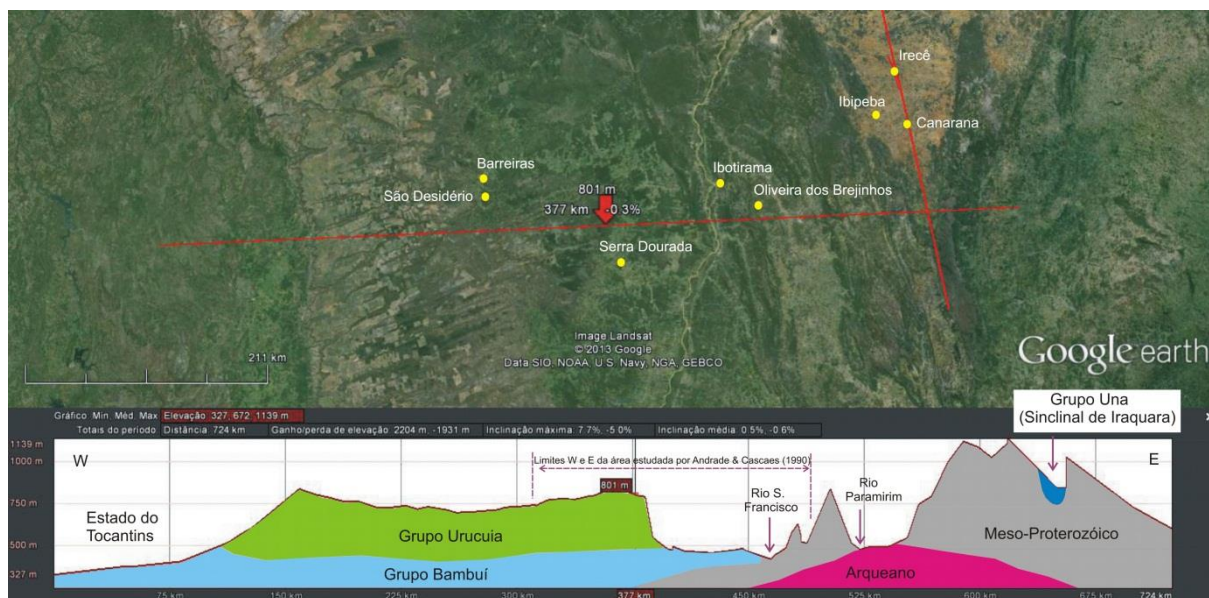


Figura 2.4: Corte geológico esquemático no centro-oeste da Bahia. Topografia obtida do Google Earth. Geologia aproximada de CPRM/CBPM (2003).

A porção oeste da área é ocupada por um proeminente chapadão esculpido nos arenitos do Grupo Urucuia com topo cerca de 250 m acima da baixada do rio São Francisco. De acordo com CPRM/CBPM (2003), as litologias cársticas do Grupo Bambuí afloram essencialmente segundo uma faixa N-S de largura variável, situada entre as cuestas do Urucuia, a oeste, e o leito do Rio São Francisco, a leste. Aparentemente, o rio São Francisco corre na região de contato entre o Neoproterozoico (Grupo Bambuí) e o Proterozoico. Este, com efeito, malgrado o extensivo capeamento Quaternário do vale, vem do Leste, aflorante, e parece mergulhar para oeste, nas cercanias da margem direita do rio, para se tornar embasamento do Grupo Bambuí na sua margem esquerda. Da região de Serra do Ramalho para sul, entretanto, o Proterozoico, vindo do Leste, não aflora até o Rio São Francisco. Mergulha muito antes para oeste, permitindo a subsistência do Grupo Bambuí, abrigado da erosão e aflorante numa vasta área da margem direita do rio, na região fronteiriça com o estado de Minas Gerais. Nessa área, portanto, o São Francisco corre encaixado nos calcários do Grupo Bambuí.

Andrade & Cascaes (1990) informam que o Aquífero Bambuí, na região em apreço, é livre, anisotrópico, heterogêneo e com espessura variável. Segundo os autores, um poço de pesquisa mineral atingiu 350 m, na porção sudeste da área, sem alcançar a base da sequência carbonatada. É frequente a presença de pelitos nos calcários, o que, juntamente com a extensa cobertura recente (aluviões e outras), inibe uma carstificação intensa como a que ocorre no Aquífero Salitre. O estudo dos

autores em pauta foi focado na análise estatística dos parâmetros profundidade dos poços, vazões, entradas d'água, resíduo total e dureza.

O histograma de frequências mostra que a maioria dos poços captando o Bambuí têm profundidade em torno de 80 m, e grande maioria das entradas d'água situa-se entre 20 e 60 m. No que diz respeito às vazões, apenas 15% dos poços ultrapassam 20,0 m³/h. Na região norte da área as vazões ficam na faixa de 5,0 a 10,0 m³/h. Na região a sul de Serra do Ramalho e ao longo da zona de contato Bambuí/Arqueano os poços têm fracas produções.

A maioria das águas apresenta resíduo total na faixa de 300,0 a 600,0 mg/l e dureza máxima de 300 mg/l. São, portanto, águas potáveis, abastecendo a maiorias das sedes municipais do Oeste Baiano, à exceção daquelas banhadas por rios perenes. Em linhas gerais, o Aquífero Bambuí no Oeste Baiano tem águas de melhor qualidade química que aquelas do Aquífero Salitre na bacia de Irecê. Em contrapartida as vazões dos poços são bem menores que aquelas do Aquífero Salitre, em função de uma menor intensidade de carstificação.

Do oeste baiano o Grupo Bambuí adentra o estado de Minas gerais, ocupando grande parte da sua porção oeste. Seu limite oeste é balizado aproximadamente pelas cidades de Unaí, Paracatu, Vazante, Patrocínio e Campos Altos. Pelo lado leste as cidades de Espinosa, Janaúba e Montes Claros são referenciais do seu limite. O fechamento do grupo de dá um pouco a norte de Belo Horizonte, sendo marcado aproximadamente pelas cidades de Sete Lagoas, Luz, Arcos e Piumhi, esta última nas imediações da Represa de Furnas.

O Grupo Bambuí em Minas tem características morfológicas diferentes daquelas do Oeste Baiano. Quando se entra em Minas as cotas na margem esquerda do São Francisco começam a crescer chegando aos 600 metros, enquanto que, do lado oriental do talvegue do São Francisco permanecem no entorno dos 460 metros. Essas cotas mais altas (600 metros) podem ser associadas a um provável alçamento de parte do flanco oeste do Rio São Francisco, que fez aflorar de forma conspícua a Formação Sete Lagoas (Iglesias & Uhlein, 2009). Essa formação, com efeito, ocorre extensivamente em Minas Gerais segundo uma faixa de largura variável, entre 20 e 50 km, no sopé das escarpas orientais do Uruçuaia.

No lado oriental do rio São Francisco, as baixas cotas caracterizam vastas planuras onde aflora extensivamente o Subgrupo Paraopeba, não deformado ou pouco deformado, com camadas sub-horizontais, recoberto em largas extensões por um capeamento Terciário-Quaternário NQd (coberturas detríticas e, eventualmente, lateríticas), segundo CPRM/COMIG (2003). Raras e restritas exposições das formações Três Marias e Lagoa do Jacaré quebram às vezes a monotonia da paisagem, formando elevações abruptas e isoladas que sobressaem na planura geral com desníveis de até 300 metros. Cita-se como mais importante a Serra do Jaíba, orientada NE-SW, no flanco direito do rio Verde Grande, entre Jaíba e Janaúba. A partir do paralelo 12° 20' Sul, na direção sul, as fácies carbonáticas do Grupo Bambuí, representadas essencialmente pela Formação Lagoa do Jacaré, passam a ocorrer significativamente (Ramos & Paixão, 2003; CPRM/COMIG, 2003). Concomitantemente, as cotas do terreno passam do entorno de 500 metros para a faixa de 600 a 700 metros

Essas características gerais do Grupo Bambuí em Minas Gerais podem ser percebidas no corte geológico N-S mostrado na Figura 2.5.

Silva *et al* (1981) estudaram uma área de 10.800 km², na região norte de Minas, nos municípios de Jaíba/Manga/Januária. O aquífero cárstico enfocado foi, na época, designado informalmente de Aquífero Jaíba. Sugerem, os autores, que esta região tem um grande potencial de água subterrânea para irrigação através de poços que podem produzir até 100 m³/h, com níveis de carstificação nos primeiros 30 a 40 m de profundidade.

Pessoa & Loureiro (2004) apresentam os resultados preliminares de estudos hidrogeológicos realizados nas rochas carbonáticas do entorno da Lagoa Santa, situada na cidade homônima, ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte. As sondagens de pesquisa executadas atingem, quase todas, o embasamento granítico-gnáissico, e mostram a existência de um pacote de carbonatos afetado por intensidades distintas de deformação. Os conglomerados basais, citados com diversas denominações por autores anteriores (Dardenne, 1978; Grossi & Quade, 1985; Pinto & Martins Neto, 2001), não foram detectados. A utilização do traçador corante Rodamina WT indicou uma velocidade média de cerca de 120 metros por hora para o fluxo subterrâneo.

Guimarães (2006) enfocou o problema da fluorose dentária, informando que no município de São Francisco, no norte do estado de Minas Gerais, existe limitada disponibilidade de mananciais hídricos superficiais devido à baixa precipitação pluviométrica concentrada em quatro meses, seguidos de um longo período de estiagem. A elevada infiltração da água no domínio cárstico de rochas calcárias fraturadas do Grupo Bambuí, por sua vez, resulta numa elevada disponibilidade hídrica subterrânea. Neste município, 70% dos habitantes residem na área rural e usam poços profundos para captação de água. Um estudo epidemiológico nos distritos de Mocambo, Vaqueta, Novo Horizonte e Alto São João, com exames clínicos da população de seis a 22 anos de idade, constatou uma prevalência de fluorose dentária em 90% da população. As concentrações de fluoreto na água subterrânea são superiores a 1,18 mg/l, atingindo valores de até 3,9 mg/l. A dissolução de minerais com flúor seriam a origem do fluoreto nessas águas, tendo sido cadastradas diversas ocorrências do mineral fluorita (CaF₂) em cristais macro e microscópicos, disseminados em veios de calcita presentes em calcarenitos do Grupo Bambuí.

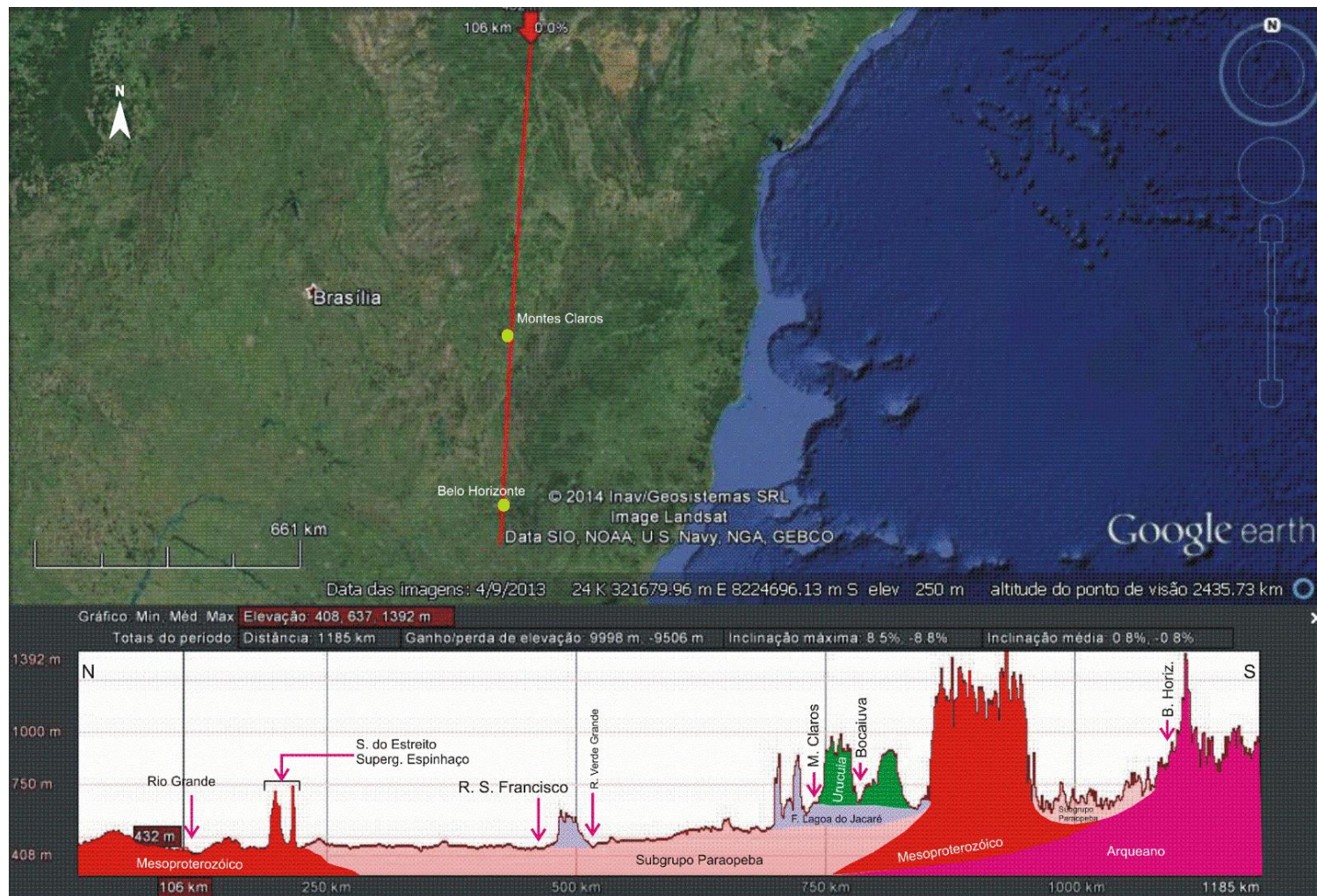


Figura 2.5: Corte geológico esquemático N-S do Grupo Bambuí. Topografia obtida do Google Earth. Geologia aproximada de CPRM/CBPM (2003) e CPRM/COMIG (2003).

2.2 O Sistema Aquífero Salitre

O Sistema Aquífero Salitre localizado na porção central do estado da Bahia, na região de Irecê é formado por rochas cársticas, constituindo um aquífero livre e heterogêneo, do tipo cárstico-fissural, em função da atuação de processos de dissolução por carbonato de cálcio, aliado à presença de um sistema de faturamento (VILLANUEVA et al - 2013)

Kuchenbecker *et al.* (2011) apontam a formação Salitre como predominante na Bacia de Irecê, conforme apresentado na Figura 2.6, que apresenta mapa e perfil geológico da região da Bacia de Irecê. O rápido crescimento demográfico e da agricultura irrigada tem ampliado consideravelmente a demanda por água subterrânea na região de Irecê, comprovado pelo acelerado número de poços perfurados e o severo rebaixamento do freático ao longo dos últimos 26 anos.

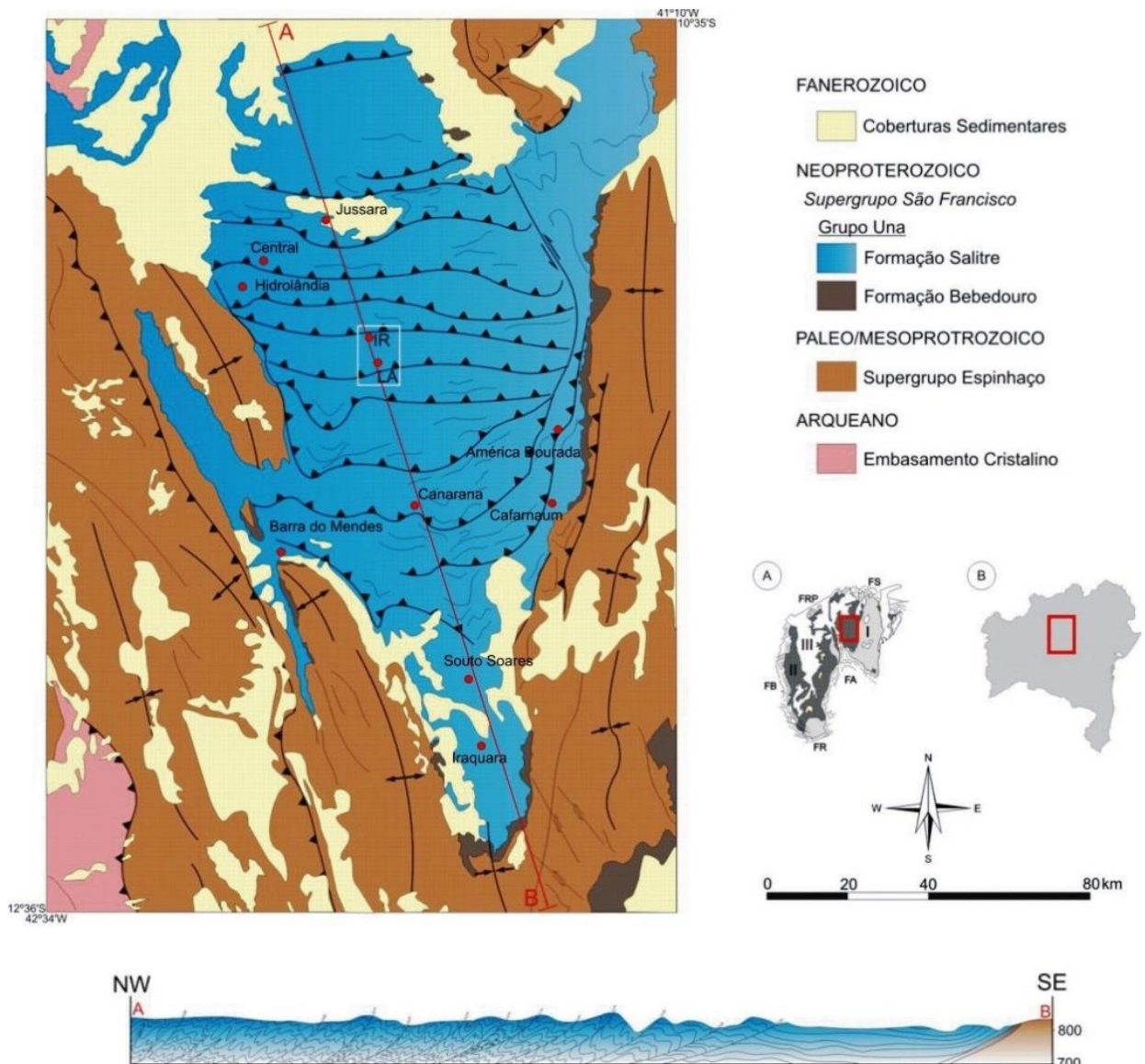


Figura 2.6: A bacia de Irecê. Adaptado de Kuchenbecker et al. (2011).

Devido ao grande aumento de poços perfurados na região central do aquífero, em função das demandas agrícolas, Silva (1973) e Ramos (2005) observaram uma taxa de rebaixamento regional do freático de cerca de um metro por ano entre 1987 e 2007.

Os autores concluem que a ampliação das áreas irrigadas entre os anos de 1987 e 2007, com utilização intensiva das águas subterrâneas do Aquífero Salitre, vêm promovendo, de forma contínua, um acentuado rebaixamento do freático, e esse rebaixamento vem ocasionando redução das descargas naturais do aquífero para os rios da região, sugerindo uma retirada superior à recarga, e caracterizando, assim, um regime de sobre-exploração. Esse processo se manifesta mais acentuadamente na porção central do aquífero entre os municípios de Irecê e Canarana, onde as atividades agrícolas estão mais concentradas e os rebaixamentos são maiores.

Da Luz *et al* (2004) fizeram uma análise estatística de cerca de 1400 poços obtidos dos arquivos da CERB, para um período de 40 anos, desde os anos 60 até o ano de 2003. Os autores dividiram a bacia de Irecê em 3 setores, denominados de Norte, Centro e Sul:

Setor Norte - a profundidade do nível estático registra um decréscimo da ordem de 2,5 a 3 m nos 40 anos de observação, passando de 13 a 18 m no final dos anos 60 para 12 a 16 m nos anos 2000, sugerindo uma discreta recuperação regional dos níveis, contradizendo o progressivo rebaixamento admitido pela maioria dos pesquisadores.

Setor Centro - as evoluções dos níveis estáticos e das vazões, não sugere qualquer aumento significativo da descarga bombeada ao longo do período amostrado.

Setor Sul - Encontram-se aí os maiores valores de nível estático de toda a área estudada, e a razão para isso é, simplesmente, a topografia.

Silva (2005) utilizou informações de 899 poços distribuídos em toda a bacia de Irecê, cadastrados na CERB até outubro de 2003. O autor observou uma tendência de rebaixamento regional do freático, desde valores médios do NE da ordem de 15 m no período 60-73, até valores médios em torno de 25 m no início dos anos 2000. O mesmo autor analisou, ainda, os ânions nitrato e cloreto e concluiu que a intensificação das atividades agrícolas na região de Irecê, nas últimas décadas, tem acarretado a contaminação das águas subterrâneas por fertilizantes nitrogenados. Assim, a presença de nitrato nas águas do Aquífero Salitre constitui hoje a principal manifestação dessa contaminação. No domínio cárstico das bacias dos rios Verde e Jacaré, essa contaminação é agravada pelo fato de que toda a população rural se abastece de água subterrânea, através de poços tubulares públicos ou particulares.

Nossa (2011) estudou uma área piloto do Aquífero Salitre com cerca de 250 km², envolvendo as cidades de Irecê e Lapão. Essa área engloba parte da área piloto do presente estudo (Bacia do Riacho do Juá) e fica inserida na bacia hidrográfica do Rio Verde.

De acordo com a autora, o comportamento hidrogeológico do Aquífero Salitre se ajusta ao quadro evolutivo regional da Bacia de Irecê. Na porção norte e central predomina o comportamento cárstico/fissural, com forte controle estrutural do processo de carstificação. O comportamento predominantemente cárstico aumenta na direção sul da bacia e nas proximidades das zonas de contato com os

metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina. As zonas mais carstificadas coincidem com as zonas de maior produtividade dos poços. Ocorrem aí, com efeito, vazões que podem chegar a 140 m³/h, quando as vazões médias dos poços, na área como um todo, ficam no entorno dos 10 m³/h. Bastos Leal & Silva (2004) *apud* Nossa (2001) observaram que as variações dos níveis freáticos na região de Irecê/Lapão apresentam uma significativa correlação com a precipitação e que apenas lâminas acima de 50 mm acarretam recuperação perceptível do freático. Em períodos de precipitações baixas ou nulas observa-se um rebaixamento acentuado dos níveis, ainda segundo os autores acima citados.

2.3 O Sistema Aquífero Urucuia (SAU)

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) ocorre principalmente na região do oeste do estado da Bahia, estendendo-se desde o extremo sul do Maranhão e Piauí, até o extremo noroeste de Minas Gerais, numa extensão N-S da ordem de 500 km, por cerca de 200 km de largura E-W em média (Figura 2.7).

ANA (2017) descreve o SAU como uma unidade hidroestratigráfica de extensão regional que ocupa a porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana – cobertura fanerozoica do Cráton São Francisco. Seu arcabouço litoestratigráfico compreende as formações constituintes do Grupo Urucuia, Posse, inferior, e Serra das Araras, superior, com distribuição espacial generalizada por toda a área. A Formação Posse é caracterizada por sucessão predominantemente arenosa, depositada por um sistema eólico-fluvial entrelaçado, enquanto que a Formação Serra das Araras é constituída por arenitos, argilitos e conglomerados depositados por sistema fluvial (Campos & Dardenne 1997a). O embasamento do aquífero é composto, na maior parte, por rochas proterozóicas, por faixas granito gnáissicas na porção centro-norte da bacia e por sedimentos paleozóicos e mesozóicos da Bacia do Parnaíba, na porção norte.

É um aquífero do tipo granular ou poroso, regionalmente homogêneo e livre. O modelo conceitual de fluxo subterrâneo estabelecido para essas condições é aquele de fluxo laminar em meio poroso, governado, de modo geral, pela área de drenagem das bacias hidrográficas associadas. ANA (2017) descreve, ainda, que as maiores espessuras preservadas do SAU alcançam cerca de 400 metros.

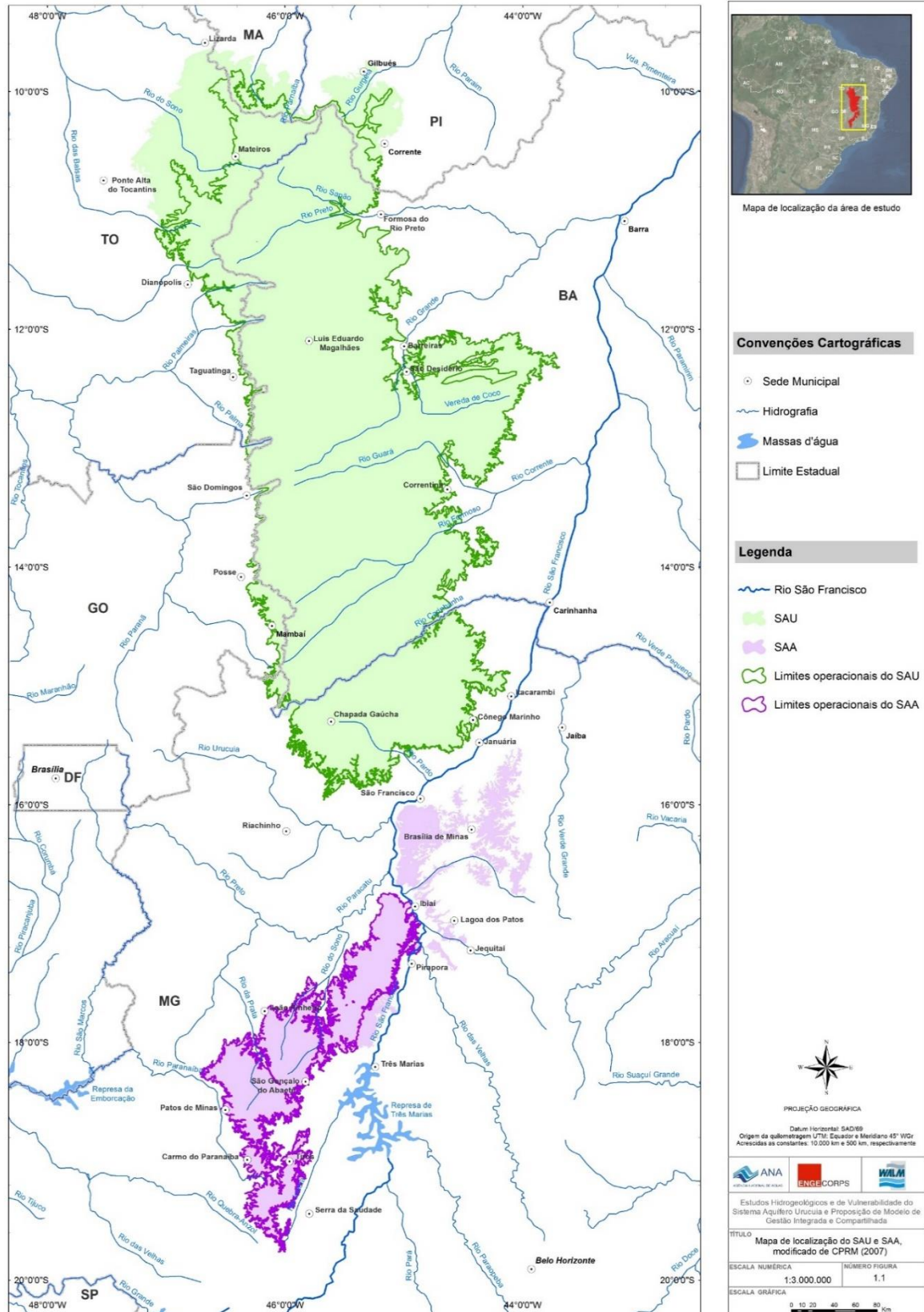


Figura 2.7: Localização do Sistema Aquífero Urucua – SAU (ANA 2017)

O Grupo Bambuí constitui, na maior parte da bacia, o substrato sobre o qual foram depositados, em discordância erosiva, os sedimentos do Grupo Urucuia. Apenas no extremo norte, os sedimentos Urucuia repousam sobre rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, e também diretamente sobre o embasamento granito-gnáissico.

Os trabalhos de Lima (2000), Amorim Jr. (2003), Amorim Jr. & Lima (2007), Tschiedel (2004), Bonfim & Gomes (2004) e Gaspar *et al.* (2012) trouxeram importantes avanços ao conhecimento do SAU. Os autores empregaram ferramentas geofísicas e os trabalhos são descritos sumariamente a seguir.

Lima (2000); Amorim Jr. (2003); Amorim Jr. & Lima (2007) empregaram a sondagem elétrica vertical (SEV) e a polarização induzida (IP) no domínio do tempo, nas bacias do rio dos Cachorros e do rio das Fêmeas, afluentes do Rio Grande. Os autores sugerem uma zona não saturada variando entre 20 e 100 metros de espessura. Na bacia do rio dos Cachorros as SEVs sugerem espessuras do Grupo Urucuia de apenas 370 metros.

Tschiedel (2004) por sua vez, trabalhou com o método da sondagem eletromagnética que o levou a sugerir espessuras da ordem de 300 a 600 m para os arenitos SAU, enquanto Bonfim & Gomes (2004) investigaram as possibilidades de o tectonismo pós-cretácico, acima comentado, haver afetado os sedimentos Urucuia. Para tal, esses autores fizeram uma integração dos estudos geológicos existentes com os estudos geofísicos disponíveis, visando a uma obtenção do panorama geral do arcabouço da bacia. Os resultados alcançados sugerem espessuras sedimentares muito variadas, de algumas dezenas a 400 m nos blocos alçados ou medianamente alçados, até valores da ordem de 1.500 m nos *grabens*.

Gaspar *et al.* (2012) utilizaram o método eletromagnético no domínio do tempo (TEM). A aquisição de dados consistiu da execução de 27 estações (*loops*), sendo três destinadas a testes de calibração e 24 do estudo propriamente dito, distribuídas em toda a bacia do Urucuia. Segundo esses autores, as espessuras do Urucuia variam entre 50 e 100 m na parte leste da bacia, podendo chegar aos 450 metros na porção oeste. Na parte sul da área a bacia apresenta um depocentro onde as espessuras atingem mais de 600 m.

Posteriormente, ANA (2017) realizou estudos geofísicos em toda a área de ocorrência dos grupos Urucuia e Areado, utilizando os métodos de eletrorresistividade e gravimetria com resultados indicando que as maiores espessuras preservadas do SAU estão na metade norte da área, podendo alcançar cerca de 400 metros.

Ainda em ANA (2017) foi estimada a recarga média estimada para o SAU em 217 mm anuais, que corresponde a 18% da precipitação média anual. Tal valor foi obtido com base nos resultados da avaliação hidrológica das vazões das estações fluviométricas no período de 1975 a 2005.

3 Cadastramento de Usuários e Pontos de Água

A etapa de cadastramento de usuários e pontos de água dividiu-se em atividades de escritório e campo.

As atividades de escritório consistiram na compilação de dados existentes de diversos órgãos: CERB - Companhia de Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos da Bahia, COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais, CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, INEMA – Instituto Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos da Bahia, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas e CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Nesta última foram obtidos os dados do SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. A Tabela 3.1 apresenta um quadro resumo das informações.

Tabela 3.1 - Poços selecionados inicialmente a partir do SIAGAS.

Fonte		Total de poços
CPRM	SIAGAS	20.641
Gestores Estaduais	IGAM/MG	3638
	INEMA/BA	2
Concessionárias	CERB/BA	1341
	COPASA/MG	725
	CODEVASF	4

Os poços obtidos dos órgãos estaduais acima citados (COPASA, CERB e IGAM) foram acrescentados à planilha inicial dos poços SIAGAS. A análise do conjunto obtido identificou duplicidades e inconsistências, principalmente porque muitos dos poços dos órgãos estaduais já estavam contabilizados na planilha SIAGAS inicial. O que levou a uma depuração do conjunto de poços, passando necessariamente por um processo de eliminação de repetições e inconsistências, além de uma delimitação mais acurada da área de estudo, com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento. A Figura 3.1 apresenta mapa com o conjunto dos poços considerados.

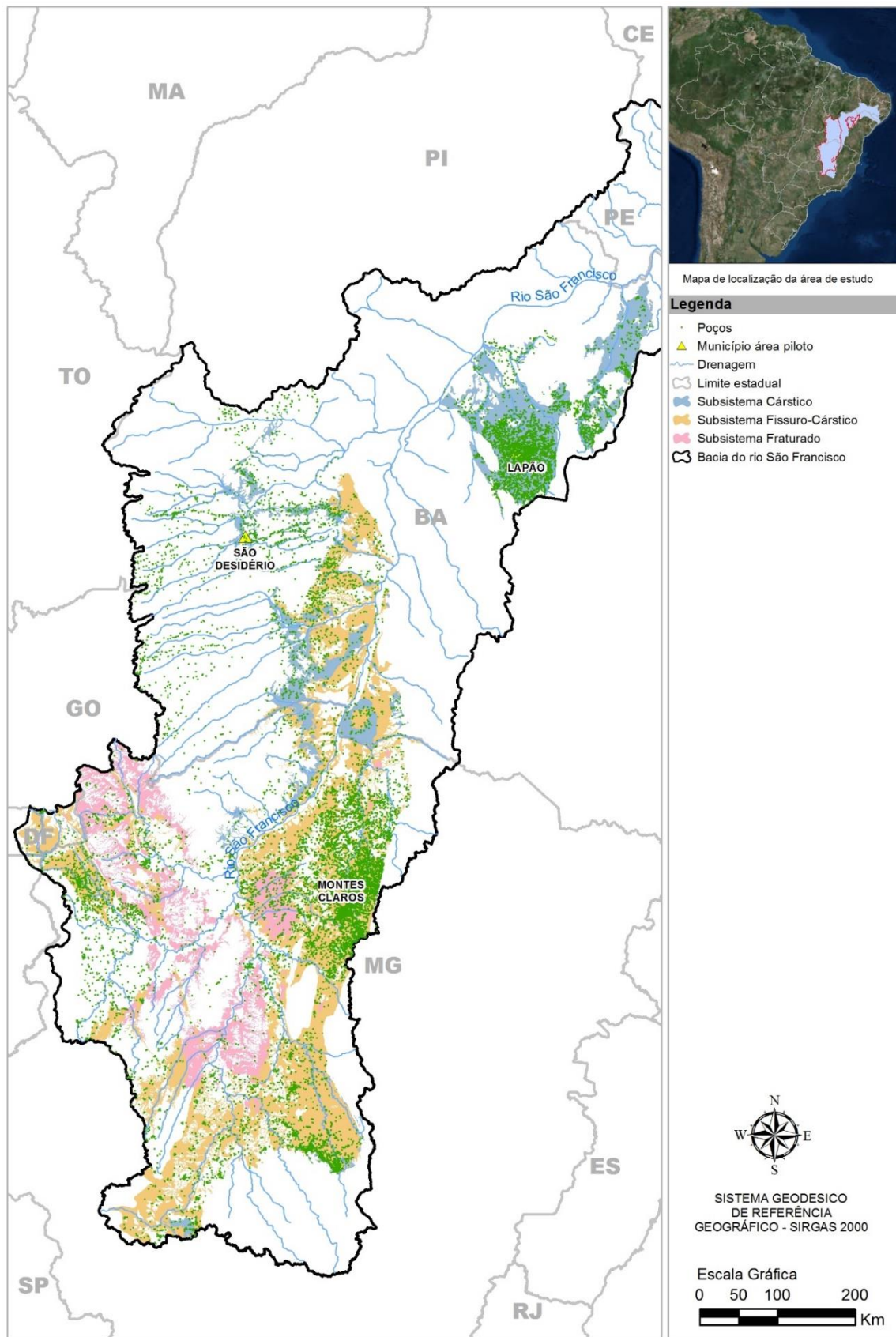


Figura 3.1: Universo dos poços selecionados

3.3 Cadastro de Pontos d'Água/Fontes de Contaminação

Foram cadastrados novos pontos d'água e fontes de contaminação. As planilhas com os pontos de água cadastrados, pontos de contaminação e pontos para mapeamento geológico são apresentadas nos Anexos 1.4 a 1.18.

3.3.1 Pontos d'Água

O cadastramento de pontos d'água teve como objetivo principal o conhecimento da infraestrutura hídrica existente, da quantidade de água subterrânea explorada e da oferta de água, considerando a capacidade instalada na região estudada. Foram cadastrados os seguintes pontos d'água:

- Áreas piloto (Irecê, São Desidério e Montes Claros): 172 pontos d'água cadastrados, sendo 147 poços tubulares e 25 pontos englobando poços amazonas, nascentes e surgências.
- Área regional: 179 pontos d'água cadastrados, sendo 135 poços tubulares e 44 pontos englobando poços amazonas, nascentes e surgências.

Dessa forma foi cadastrado um total de 351 novos pontos d'água, sendo 282 poços tubulares (80,3%) e 69 pontos englobando poços amazonas, nascentes e surgências (19,7%).

Na Figura 3.2 mostra-se o resultado da análise das profundidades dos poços cadastrados nas três áreas piloto

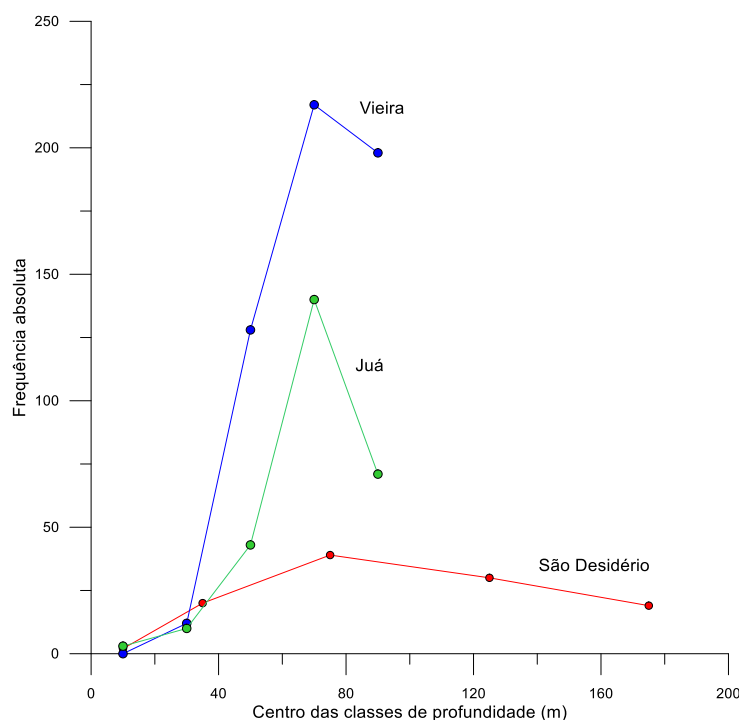


Figura 3.2: Frequência absoluta das profundidades

Verifica-se, na Figura 3.2 que as profundidades dos poços na área piloto de São Desidério são menores que nas demais áreas piloto, havendo uma frequência significativa de poços perfurados abaixo dos 100 metros. Isso se explica pela presença significativa do Sistema Aquífero Urucuia na Chapada de Baianópolis.

No carste propriamente dito (áreas piloto do Vieira e do Juá), o cadastramento sugere que as profundidades mais frequentes se situam na faixa dos 60 aos 80 metros (Figura 3.2). Análises das produtividades dos poços nas áreas piloto¹ sugerem ainda que a carstificação nos sedimentos carbonatados não vai além dos 120 metros de profundidade. Por esta razão a espessura do aquífero cárstico, no presente estudo e no presente estágio de conhecimentos, é considerada como 120 metros, em todo o carste São Francisco. A espessura saturada é menor, naturalmente, uma vez que depende da posição do freático.

Na Figura 3.3 Figura 3.3 apresentam-se os percentuais de poços tubulares e poços amazonas/nascentes/surgências.

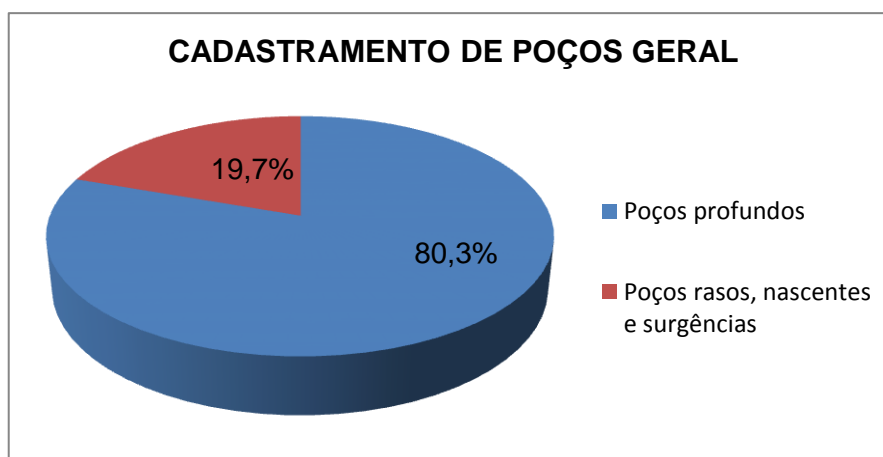


Figura 3.3: Porcentagem do cadastramento de poços geral.

3.3.2 Fontes de contaminação

Os dados para identificação de possíveis fontes de contaminação provêm de três origens: dados coletados pelo consórcio durante os trabalhos em campo, dados disponibilizados pela ANA e dados coletados de outras fontes de pesquisa.

Inicialmente as fontes levantadas em campo pelo Consórcio foram disponibilizadas em três planilhas (uma para cada área piloto). Estas foram compatibilizadas em apenas uma planilha contendo 87 fontes de contaminação, onde cada fonte dispõe das seguintes informações: identificação (cemitério, posto de combustível, lixão, estação de tratamento de esgoto, entre outros), endereço, município, UF, coordenadas de localização, data da coleta, condição (em funcionamento, desativado ou em construção) e observações quando necessárias.

Foram consideradas, também, dados de ANA (2015) onde constam todas as outorgas de direito de uso de recursos hídricos concedidas pelo órgão entre os anos de 2001 e 2015 no território nacional. Foram levantadas informações sobre os requerentes e características técnicas das fontes de recursos hídricos utilizadas. Assim, foram filtrados apenas os pontos de outorgas com o tipo de interferência ponto de lançamento e localizados na área de estudo, totalizando 47 fontes de

¹ Áreas piloto do rio São Desidério (BA), do riacho do Juá (BA) e do rio do Vieira (MG).

contaminação, dentre aquicultura, esgotamento sanitário, irrigação e mineração (extração de areia).

Para complementar o levantamento de fontes potenciais de contaminação foram identificados indústrias, cemitérios, lixões/aterros sanitários e postos de combustíveis em diversas fontes alternativas como *OpenStreetMap* e pesquisa na internet, totalizando 1272 pontos.

Postos de combustíveis - O levantamento dos postos de combustíveis foi efetuado através de consulta ao cadastro da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), disponível na *internet*. A pesquisa foi feita em cada município localizado dentro das fronteiras de cada domínio.

As coordenadas geográficas foram obtidas com auxílio do programa *Google Maps*, a partir dos endereços informados na consulta anterior, sendo possível localizar com maior precisão os postos de combustíveis levantados. Por fim, com uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram identificados os postos de combustíveis que estão exatamente dentro dos limites da área de estudo.

Cemitérios - O levantamento de cemitérios existentes nos municípios abrangidos pelos domínios foi realizado a partir de análise de imagens do programa *Google Earth*, fazendo-se a varredura de todas as manchas urbanas de sedes municipais e seus distritos.

Alguns municípios apresentam imagens com alto brilho, cobertura de nuvens ou resolução inadequada para identificação dos alvos de interesse. Como exemplo dessas características é o município de Francisco Dummont.

Lixões/aterros sanitários - Para levantamento dos lixões ou aterros sanitários existentes na área de estudo foram realizadas pesquisas múltiplas, onde foi consultada a base de dados do Atlas de Saneamento 2011 (IBGE, 2011), que apresenta informações sobre o manejo de resíduos sólidos. Além disso, foram consultados sites específicos de cada cidade. Confirmando a presença de algum local para disposição final dos resíduos, foi feita uma varredura nas manchas urbanas das cidades e distritos localizados na área de estudo pelo programa *Google Earth*.

Todos os dados levantados foram compatibilizados de maneira a evitar a duplicidade de pontos. Dessa forma, foi construída uma base de dados única com 800 fontes de contaminação, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Fontes contaminantes levantadas na área total de trabalho.

ATIVIDADE	QUANTIDADE
Indústria	84
Lixão/aterro	44
Esgotamento sanitário	29
Cemitério	229
Posto de combustível	877
Mineração*	4
Agricultura*	3
Aquicultura*	1
Irrigação*	1
TOTAL	1272

*Os dados levantados dessas fontes foram a partir dos dados de outorga da ANA.

Os pontos de contaminação foram espacializados e inseridos no sistema de informações geográficas juntamente com as classes de uso e ocupação do solo, domínios morfoestruturais e estruturas cársticas (cavidades e dolinas), o que possibilitou a geração do Mapa de Uso e Ocupação do Solo e Fontes Contaminantes da área total de estudo (Figura 3.4).

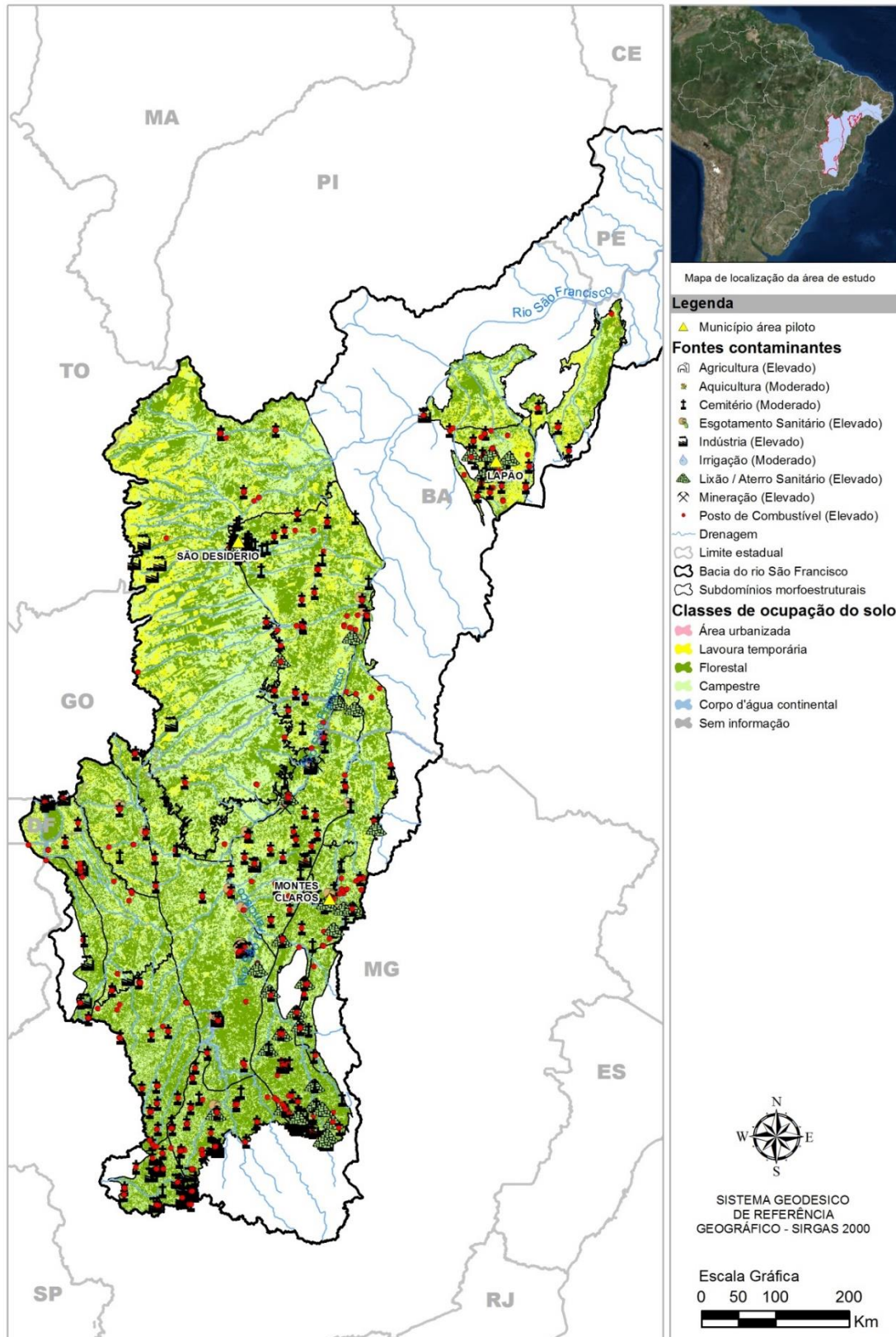


Figura 3.4: Uso e ocupação do solo na área de estudo com as fontes contaminantes.

4 Mapa de Aquíferos e Produtividade

O Mapa de Aquíferos regional do Sistema Aquífero Bambuí e Subsistemas, na Região Hidrográfica do São Francisco, é constituído de 38 folhas na escala de 1:250.000 cuja articulação é mostrada na Figura 4.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que inclui as articulações das folhas das áreas piloto: rio São Desidério, na escala de 1:100.000; riacho do Juá e rio do Vieira, na escala 1:50.000. O Mapa de Aquíferos propriamente dito é mostrado na Figura 4.1.

O Mapa de Aquíferos mostrado na Figura 4.2 cobre uma superfície de 334.620,25 km². Nele são mostradas as unidades hidrogeológicas de fluxo individualizadas de acordo com o tipo de porosidade das rochas que as constituem.

No item 2 do presente relatório fala-se genericamente na unidade de porosidade fissural que, juntamente com as unidades granular, cárstica e fissuro-cárstica, ocorre na bacia hidrográfica do São Francisco. Entretanto, esta unidade é constituída predominantemente de rochas ígneas e metamórficas que fogem dos objetivos do presente estudo.

Vamos considerar, assim, como indicado no Mapa de Aquíferos (Figura 4.2) apenas as três unidades hidrogeológicas de fluxo de interesse para o presente estudo: i) Unidade Granular (Gr); ii) Unidade Fissuro-Cárstica (Fr); iii) Unidade Cárstica (K).

A Tabela 4 mostra que a maior parte da área (54,88%) é constituída de terrenos granulares. Esses terrenos são representados por depósitos aluvionares, coberturas detrito-lateríticas ferruginosas, arenitos cretácicos dos Grupos Urucua e Areado, além de arenitos paleozoicos da Formação Santa Fé.

Tabela 4.1 – Unidades Hidrogeológicas de Fluxo da Bacia do Rio São Francisco.

UHF	Soma de Área	%
Gr	183.637,33	54,88%
Fr	102.945,59	30,76%
K	48.037,38	14,36%
Total Geral	334.620,25	100%

Secundariamente, ocupando 30,76% da área, se encontra o domínio das rochas fissuro-cársticas com um misto de porosidade cárstica e de fraturas e, finalmente, em 14,36% da área, cobrindo uma superfície da ordem de 48 mil km² estão as rochas carbonáticas das Formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré, Salitre e São Desidério, nas quais se desenvolve o Sistema Aquífero Bambuí e o Aquífero Salitre, com porosidade tipicamente cárstica, ou seja, oriunda de fenômenos de dissolução.

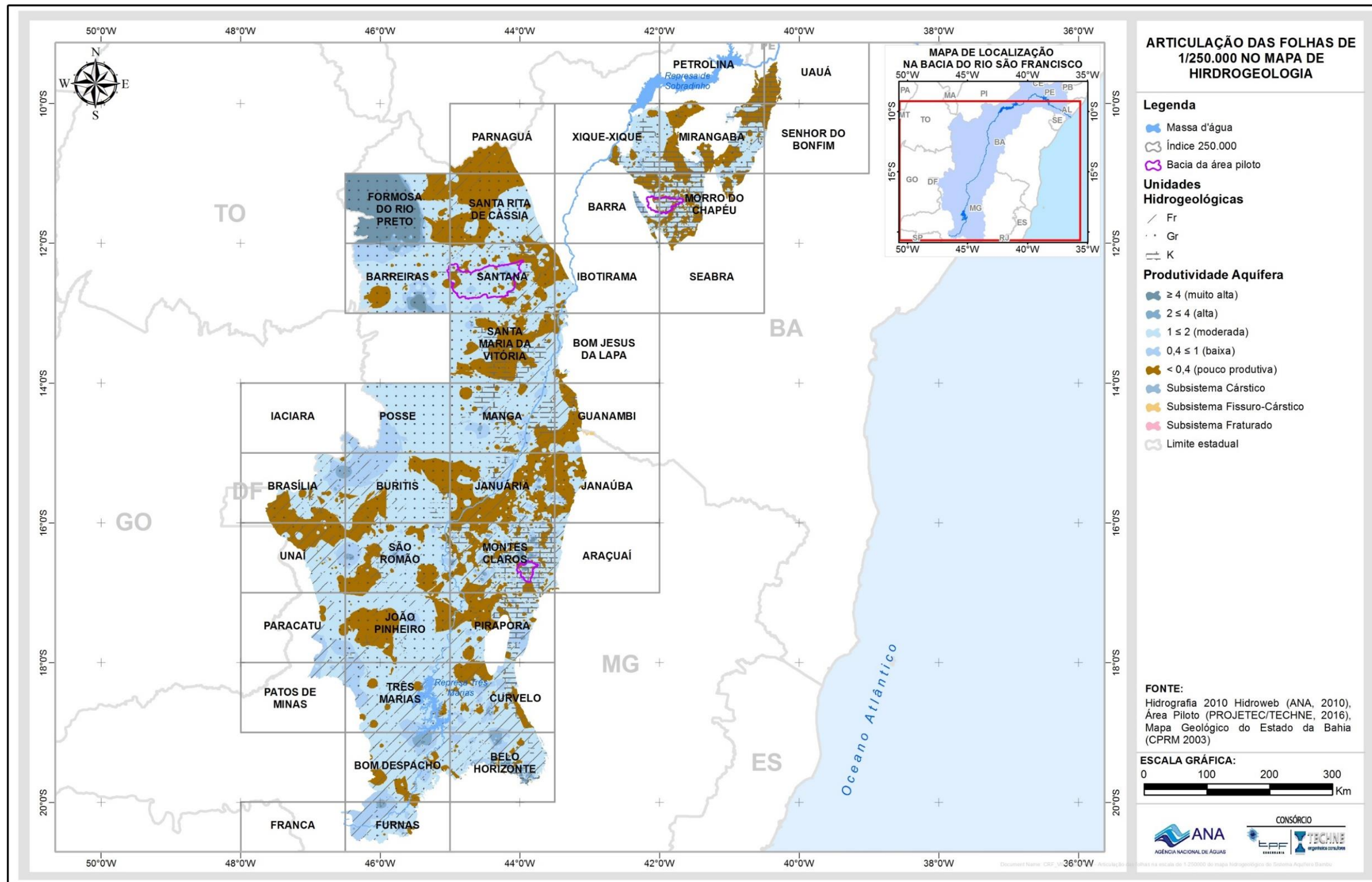


Figura 4.1: Articulação das folhas na escala de 1:250.000 do Mapa de Aquíferos do Sistema Aquífero Bambuí na Região Hidrográfica do São Francisco e das folhas das Áreas Piloto na escala 1:100.000 (São Desidério) e na escala 1:50.000 (Riacho Juá – Irecê, BA e Rio do Vieira- Montes Claros, MG).

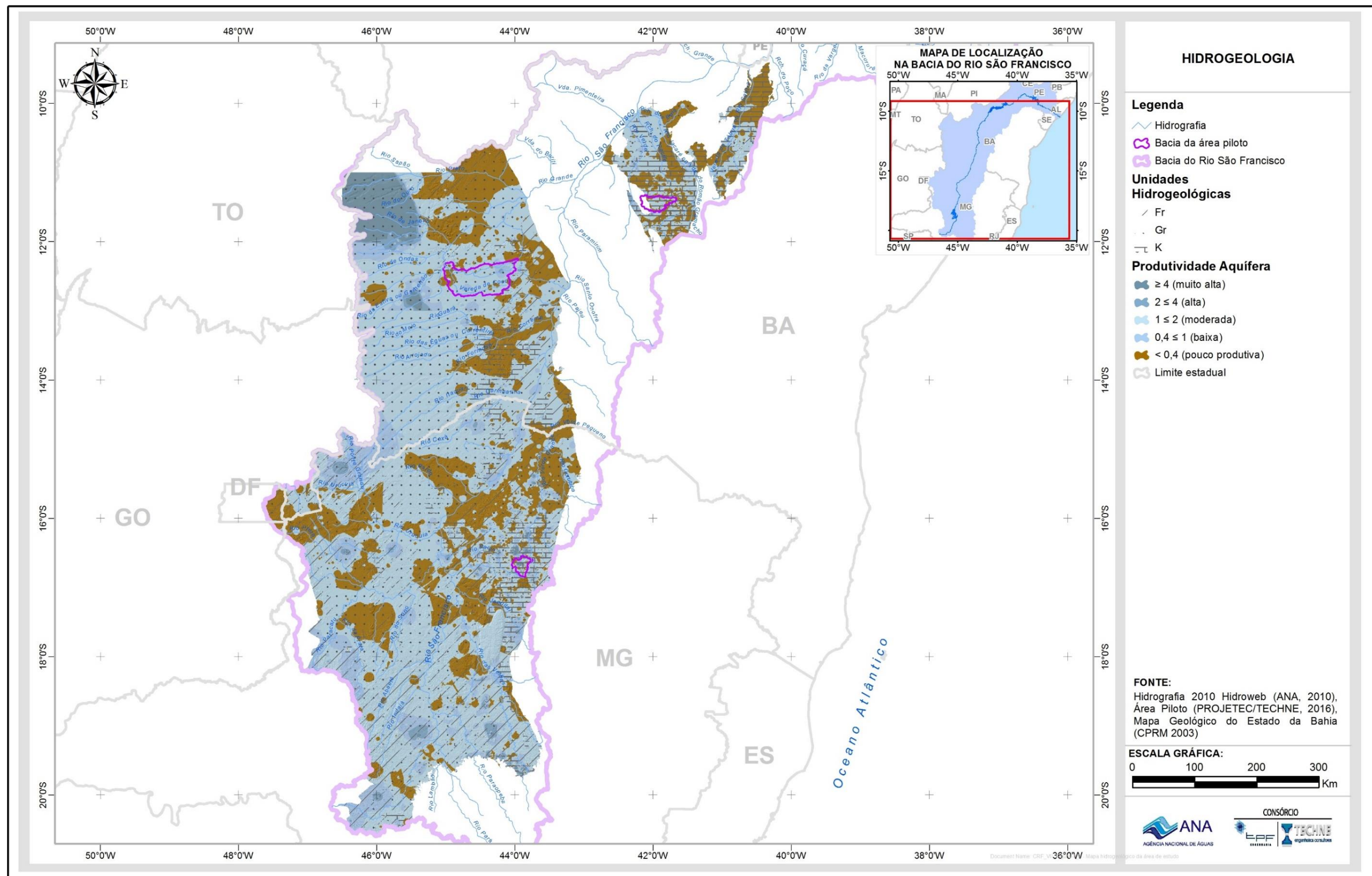


Figura 4.2: Mapa de Aquíferos da área de estudo

4.1 Potencial de produção de água subterrânea

O Mapa de Aquíferos tem o objetivo de descrever e mapear os depósitos de água subterrânea, zoneando as áreas com maior potencial de produção de água. Para esse trabalho foram identificados dentro do banco de dados organizado para o trabalho, as informações sobre os testes de aquíferos registrados e analisadas as capacidades específicas obtidas, como adiante demonstrado.

Foram identificados um total de 6.278 unidades com capacidades específicas de teste conhecidas. Na Tabela 4.2 são mostrados os intervalos que definem cinco classes de capacidade específica adotadas para se fazer o zoneamento da produtividade dos aquíferos. Esses mesmos intervalos são mostrados graficamente na Figura 4.3.

Agrupamento das faixas de variação identificadas para a capacidade específica dos testes:

- Valores muito altos, superiores a 4 m³/h/m, destacados em rosa, ocorrem em 23,2% dos poços (1457/6277) havendo 1,6% de poços (103/6277) com capacidades específicas superiores a 100 m³/h/m, variando de 101 a 3.000 m³/h/m, o que naturalmente sugere tratar-se de poços que atingiram cavernas ou sumidouros nas zonas cársticas;
- Valores altos, na faixa de 2 a 4 m³/h/m, destacados em azul, correspondem a 10,6% dos poços (666/6.277).
- Valores moderados, no intervalo de 1 a 2 m³/h/m, destacados em vermelho, correspondem a 11,5 % dos poços (718/6.277).
- Valores baixos, no intervalo de 0,4 a 1 m³/h/m, destacados em verde, têm-se 16,1% dos poços (1.012/6.277).
- Valores muito baixos (38,6%) ou (2.424/6.277), destacados em preto, diz respeito a poços com capacidade específica inferior a 0,4 m³/h/m.
- Considerando-se um rebaixamento de 25,0 têm-se, na quarta coluna da Tabela 4.2, os intervalos de vazão explotável que correspondem às classes de vazão específica zoneadas no Mapa de Aquíferos da Figura 4.2.

Tabela 4.2 – Classes de produtividade de aquífero na Bacia do Rio São Francisco.

Classe	Produtividade	Capacidade específica (m ³ /h/m)	Vazão de Explotação (m ³ /h)
1	Muito alta	$x > 4$	$x > 100$
2	Alta	$2 < x \leq 4$	$50 < x \leq 100$
3	Moderada	$1 < x \leq 2$	$25 < x \leq 50$
4	Baixa	$0,4 < x \leq 1$	$10 < x \leq 25$
5	Muito baixa	$x \leq 0,4$	$x \leq 10$

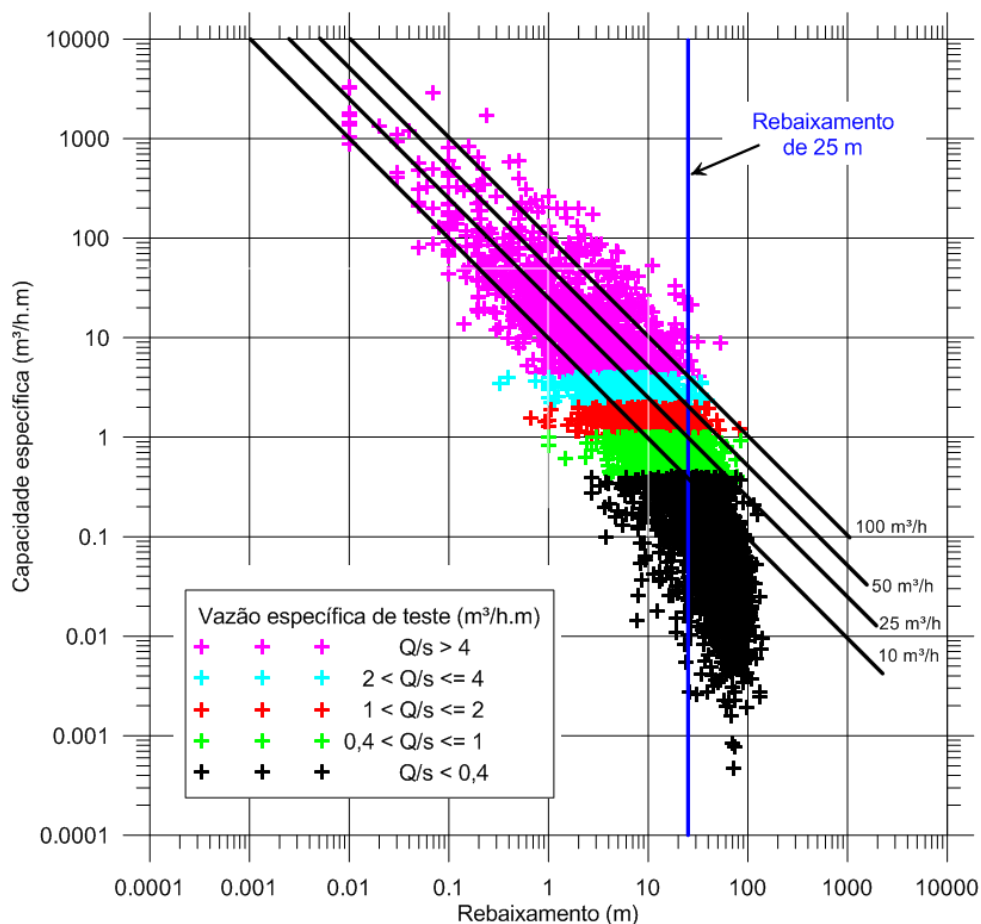


Figura 4.3: Capacidade específica de teste e produtividade para rebaixamento de 25 m no sistema aquífero cárstico fissural do São Francisco.

Em termos de vazão explotável dos poços a classe (1) corresponde a poços com vazão superior a 100 m³/h; a classe (2), a poços com vazões na faixa de 50 a 100 m³/h; a classe (3), a poços com vazão de 25 a 50 m³/h; a classe (4) a poços com vazão compreendida entre 10 e 25 m³/h e finalmente a classe (5), a poços com vazão inferior a 10 m³/h. Notar que em todas as unidades hidrogeológicas mapeadas (Figura 4.2) mais de 50% dos poços apresentam produtividade muito baixa e ficam na classe (5).

4.2 Produtividade por Unidade Hidrogeológica

Foi feita uma avaliação do potencial de produção de água subterrânea nas unidades hidrogeológicas mapeadas na Figura 4.2. Foram obtidos os seguintes resultados.

4.2.1 Unidade Granular

A Tabela 4.2 mostra que no meio granular (Gr no mapa de aquíferos da Figura 4.2) a grande maioria dos poços (cerca de 87%) apresentam produtividade variável de baixa (31%) a muito baixa (56%). Esses são poços perfurados em passagens granulares, geralmente sílticas, do Grupo Bambuí, tais como as que ocorrem nas formações Serra da Saudade e Serra de Santa Helena

A produtividade é moderada em cerca de 9% dos poços, restando apenas aproximadamente 4% de poços com produtividade alta (3,90%) e muito alta (1,90). Essas duas classes correspondem a poços nos arenitos Urucuia.

Tabela 4.3 – Classes de produtividade no Domínio Granular

Classe de Produtividade (m³/h/m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$x > 4$	20	20	0,0193	1,9
$2 < x \leq 4$	20	40	0,0193	3,9
$1 < x \leq 2$	93	133	0,0899	13,0
$0,4 < x \leq 1$	322	455	0,3114	44,0
$x \leq 0,4$	579	1034	0,5600	100,0
Total	1034			

4.2.2 Unidade Cárstica (K)

Seguindo uma tendência não muito diferente daquela do meio granular, na unidade cárstica (K no mapa de aquíferos da Figura 4.2) a produtividade na grande maioria dos poços (82,3%) varia de muito baixa (50%) a baixa (32,3%); a produtividade moderada corresponde a 10,4% dos poços, restando finalmente uma minoria de 7,3% com produtividade alta (4,3%) e muito alta (3%) Tabela 4.3Tabela 4..

Tabela 4.4 – Classes de produtividade na Unidade Cárstica

Classe de Produtividade (m³/h/m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$x > 4$	98	98	0,0294	2,9
$2 < x \leq 4$	144	242	0,0432	7,3
$1 < x \leq 2$	347	589	0,1042	17,7
$0,4 < x \leq 1$	1075	1664	0,3227	50,0
$x \leq 0,4$	1667	3331	0,5005	100,0
Total	3331			

4.2.3 Unidade Fissuro-Cárstica

A distribuição de frequência da produtividade na unidade fissuro-cárstica (Fr no mapa de aquíferos da Figura 4.2), como mostra a Tabela 4.4

Tabela 4., não apresenta diferença significativa em relação às produtividades observadas nas unidades granular e cárstica. De fato, os dados mostram que 82,5% dos poços na unidade fissuro-cárstica se caracterizam por uma produtividade muito baixa (53,1%) e baixa (29,4%); com produtividade moderada tem-se 10,3% dos poços, restando apenas 7,2% de poços com produtividade baixa (4,4%) e muito baixa (2,8%).

Tabela 4.5 – Classes de produtividade na Unidade Fissuro-Cárstica

Classe de Produtividade (m ³ /h/m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
x > 4	53	53	0,0278	2,8
2 < x ≤ 4	83	136	0,0435	7,2
1 < x ≤ 2	197	333	0,1034	17,5
0,4 < x ≤ 1	561	894	0,2943	46,9
x ≤ 0,4	1012	1906	0,5310	100,0
Total	1906			

4.3 Reservas e Recargas

As avaliações das reservas permanentes e das recargas foram feitas ao longo dos estudos por subdomínios e, nestes, por formação aquífera. Considerou-se a área de ocorrência de cada formação, sua espessura saturada e sua porosidade efetiva. A reserva de cada subdomínio é dada pela soma das reservas das suas formações aquíferas. A reserva permanente de um dado aquífero é dada por sua área de ocorrência (A) x espessura saturada (b) x porosidade efetiva equivalente (\square_e).

Na Tabela 4.6 é apresentada uma síntese desses resultados.

Tabela 4.6 – Reservas permanentes e recargas

Subdomínio	Reservas (hm ³)	Recargas (hm ³ /ano)
I - Grupo Vazantes	33.923,19	1.522,00
II a	49.369,03	1.195,00
IIb	34.164,10	1.438,20
IIc	65.616,05	2.085,00
IId	44.056,73	1.003,30
IIIa	22.519,37	2.044,40
IIIb	27.363,72	1.812,70
IIIc	120.470,01	2.058,30
IIId	67.801,03	1.614,90
IIIe	150.241,36	796,60
IVa	87.461,63	3.020,00
IVb	39.976,12	684,00
V	84.263,08	15,00
VI	18.794,79	35,00
VII	73.692,00	4,75
Totais	919.712,21	19.329,15

4.4 Comentários

O zoneamento da produtividade dos poços, mostrado no Mapa de Aquíferos (Figura 4.2), permite os seguintes comentários:

- Na unidade granular (Gr), as maiores produtividades (4% dos poços) correspondem aos arenitos dos grupos Urucuia e Areado, além de pequenas e raras manchas isoladas na área de estudo. No Urucuia, em particular, as vazões específicas chegam a atingir e mesmo superar os 4,0 m³/h/m, o que contrasta nitidamente com a produtividade de outras litologias menos generosas do domínio granular.
- Na unidade cárstico (K), predominam vazões específicas entre baixas e muito baixas, compreendidas entre 0,4 e 1,0 m³/h/m. Localmente, em áreas restritas, como na região de Jaíba/MG e na região de Irecê, por exemplo, ocorrem vazões específicas maiores, variando entre 1,0 e 2,0 m³/h/m. Este panorama de vazões, Na unidade cárstico, pode ser significativamente melhorado na medida em que sejam adotados sistematicamente critérios mais refinados de locação como, por exemplo, a utilização de métodos geofísicos. As litologias do domínio cárstico ocorrem predominantemente na Formação Sete Lagoas que é a formação basal do Grupo Bambuí, e na Formação Salitre do Grupo Una.
- Na unidade fissuro-cárstico (Fr) a situação é semelhante à do domínio cárstico, com predomínio de vazões específicas entre baixas e muito baixas, compreendidas entre 0,4 e 1,0 m³/h/m. Também aqui ocorrem localmente vazões específicas maiores, variando entre 1,0 e 2,0 m³/h/m. As litologias do domínio fissuro-cárstico ocorrem predominantemente nas formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, do Grupo Bambuí.

Tabela 4.7 – Classes globais de produtividade independente das unidades hidrogeológicas

Classe de Produtividade de Aquífero (m ³ /h/m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$x > 4$	171	171	0,0272	2,7
$2 < x \leq 4$	247	418	0,0393	6,7
$1 < x \leq 2$	637	1055	0,1015	16,8
$0,4 < x \leq 1$	2042	3097	0,3253	49,3
$x \leq 0,4$	3181	6278	0,5067	100,0
Total	6278		1	

5 Domínios e subdomínios hidrogeológicos

Domínios hidrogeológicos são grandes áreas que comungam feições idênticas ou muito próximas, quanto à geomorfologia, geologia, estrutura, padrões de deformação, litologia, hidrogeologia, recarga e descarga. Subdomínios são

áreas, nos domínios, onde são percebidas diferenciações nessas feições, mas que não são suficientes para individualizar um novo domínio. Para o presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia de separação da área em domínios e subdomínios, de forma a facilitar o entendimento da dinâmica hídrica em uma área cárstica.

Assim, o Carste São Francisco foi subdividido em sete domínios e estes em subdomínios conforme mostrado a seguir:

- Domínio I – Constituído de apenas um subdomínio, intitulado Grupo Vazante.
- Domínio II – Constituído dos subdomínios IIa, IIb, IIc e IId.
- Domínio III - Constituído dos subdomínios IIIa, IIIb, IIIc, IIId e IIIE.
- Domínio IV – Constituído dos subdomínios IVa e IVb.
- Domínio V – Constituído de um único subdomínio intitulado Bacia de Irecê a.
- Domínio VI – Constituído de um único subdomínio intitulado Bacia de Irecê b.
- Domínio VII – Constituído de um único subdomínio intitulado Bacia do Salitre.

Na Figura 5.1 mostra-se uma visão panorâmica do Carste São Francisco com a distribuição dos domínios e respectivos subdomínios. Observa-se, nessa figura, que os domínios I, II e III, ocupam praticamente toda a área de estudo, à exceção da estreita faixa sul-oriental do Carste, consignada ao Domínio IV, e das áreas de ocorrência do Grupo Una, consignadas aos domínios V, VI e VII.

5.1 Metodologia para cartografia do carste

A fim de produzir um material cartográfico que represente de forma eficiente o carste da bacia do São Francisco, tendo em vista a gestão dos recursos hídricos, foi proposta uma abordagem integrada. Além da importância dos ricos atributos espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos que demandam um manejo especial, o carste na bacia do rio São Francisco tem grande relevância no cenário hídrico superficial e subterrâneo dos distintos estados banhados pelo rio.

O entendimento da relevância do ambiente cárstico na manutenção das reservas e na dinâmica da água requer discretizar os elementos do meio físico de interesse e articular os processos naturais de construção da paisagem que estão associados a esses elementos. Tendo em vista a grande extensão da bacia do São Francisco e as importantes diferenças na sua constituição geológica, bem como nas suas características geomorfológicas e climáticas, é importante espacializar tais informações, além de conhecer os elementos e processos que se relacionam ao carste.

Desse modo, os procedimentos que estão sendo aplicados na cartografia do carste da bacia do rio São Francisco, visam não apenas representar em mapa as estruturas típicas da paisagem cárstica, mas ainda fornecer subsídios para a interpretação dos cenários hidrogeológico, geomorfológico e climático que se

manifestam de forma tão determinante no potencial hídrico das distintas unidades.

O mapeamento da região cárstica previu duas etapas. Primeiramente foram mapeadas as unidades cársticas e a estrutura física que as diferenciam e, em seguida, os elementos que controlam a dinâmica hídrica do carste (Figura 5.1).

5.1.1 Mapeamento das unidades cársticas e estrutura física

O primeiro trabalho para a definição das unidades cársticas é identificar as estruturas que denotam a existência de processos de carstificação nas rochas aflorantes. O delineamento das feições de superfície típicas do relevo cárstico é feito em toda a bacia, sendo a localização de cavidades uma ferramenta auxiliar no reconhecimento desses notáveis atributos, os quais auxiliam na escala pretendida de mapeamento e na indicação de zonas mais promissoras, em termos da ocorrência de processos de dissolução. Dentre as feições de interesse, já foram selecionadas dolinas, uvalas, vales cegos e paredões calcários que podem ser visualizados na escala 1:250.000. Foi estabelecida uma metodologia para varredura automática visando à seleção inicial dessas feições. Em seguida, partindo-se da análise interpretativa das bases cartográficas disponíveis, imagens de satélite e superfícies topográficas geradas por geoprocessamento, foram validadas as feições e incluídas novas estruturas.

Além das feições anteriormente citadas, foram traçados lineamentos de relevo por meio da análise de curvas hipsométricas bem como do modelo digital de elevação, com sombreamento em distintas direções. Os lineamentos têm grande importância na interpretação geomorfológica e nas características estruturais das rochas. Os lineamentos marcam domínios estruturais e ressaltam as direções e intensidade das discontinuidades nas rochas, e essas, por sua vez, podem controlar o desenvolvimento da carstificação e o potencial aquífero.

A varredura em busca de todos esses elementos foi realizada para toda a bacia e vai constituir o mapa de feições cársticas do projeto. A título de exemplo, na Figura 5.1 é mostrada a representação de uma das folhas tratadas sob esta perspectiva.

Após mapear as feições cársticas do relevo e os lineamentos estruturais, estão sendo definidas as unidades cársticas. Para isso, primeiramente, avalia-se no mapa geológico as grandes unidades com ocorrência de rochas carbonáticas e, em seguida, os domínios geotectônicos de ocorrência dessas unidades. São reconhecidos, na sequência, subdomínios geológicos e, por fim, delimitam-se as diferentes unidades cársticas presentes nesses subdomínios.

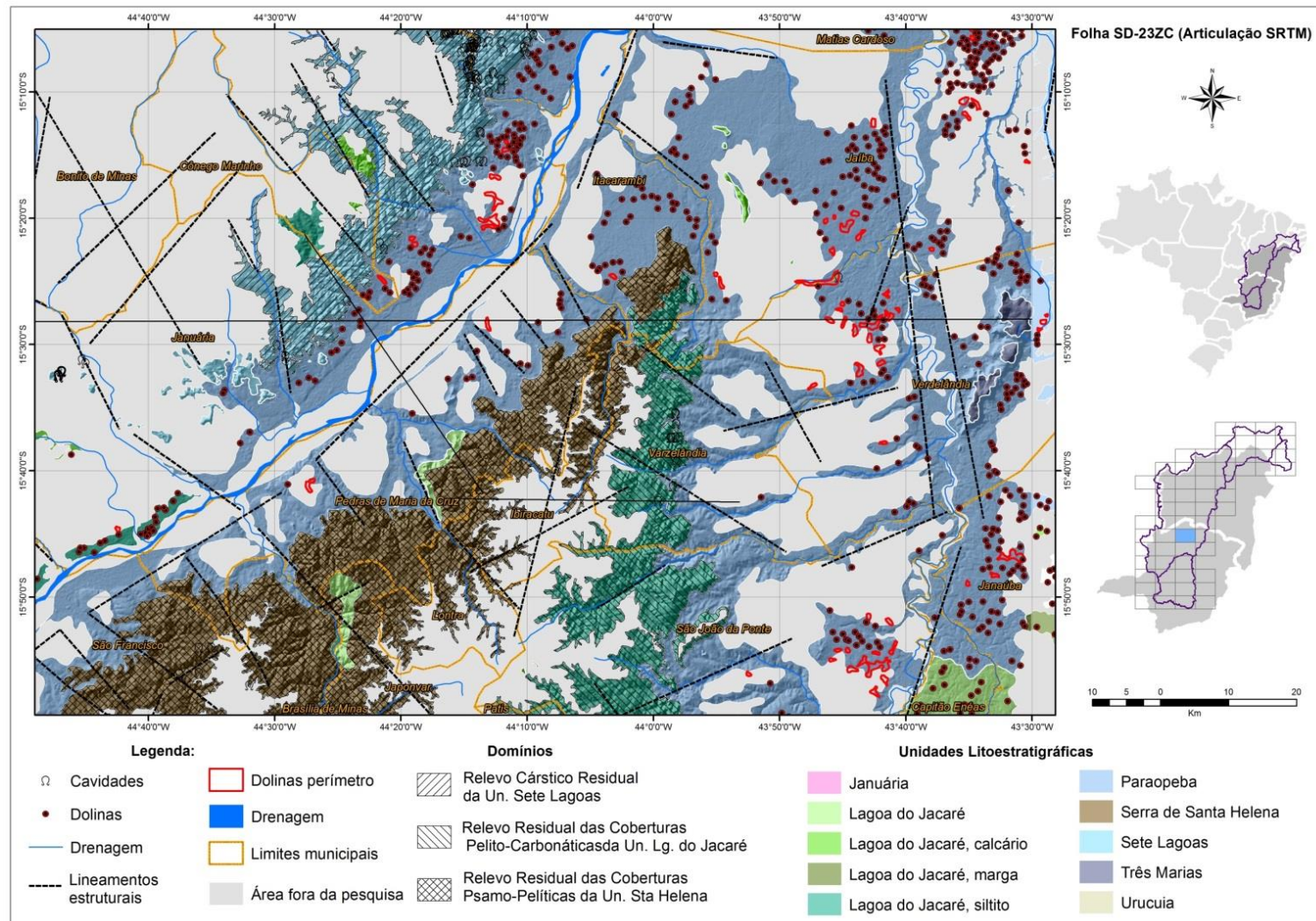


Figura 5.1: Capacidade específica de teste e produtividade para rebaixamento de 25 m no sistema aquífero cárstico fissural do São Francisco.

5.1.2 Definição das unidades cársticas

Dentro do cráton do São Francisco, as principais unidades portadoras de calcários e dolomitos são as coberturas neoproterozoicas, depositadas em ambientes marinhos rasos que ocupavam grandes áreas pretéritas. Essas bacias marinhas passaram por variações nas condições de sedimentação, o que gerou uma pilha sedimentar diferenciada.

O edifício estratigráfico, com intercalações de calcários, dolomitos, margas, siltitos e folhelhos, registra ciclos sedimentares marcados pelas oscilações do nível do mar, aumento do espaço de sedimentação e aporte de sedimentos. Esses controles de sedimentação atuaram de forma diferente ao longo do tempo e espaço, dependendo das variações climáticas e da distribuição das tensões ao longo do período orogênico Brasileiro ao redor de todo o cráton.

Na bacia hidrográfica do rio São Francisco as unidades portadoras de carbonatos são representadas pelas formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade, pertencentes ao Grupo Bambuí, o Grupo Vazante, localizado no extremo oeste do cráton, e a Formação Salitre, pertencente ao Grupo Una, nas bacias de Irecê e do Salitre.

Apesar dos conjuntos sedimentares desses grupos serem correlacionáveis e apresentarem certa similaridade, evidenciada pela presença de pelo menos dois ciclos sedimentares transgressivos-regressivos, conforme mostra Misi (2001), a espessura da pilha sedimentar e das coberturas, a composição e variedade textural dos carbonatos presentes, as direções das estruturas e intensidade de descontinuidades, são algumas características que variam muito de uma unidade a outra e ao longo da suas áreas de ocorrência na bacia do rio São Francisco. Essas características condicionam as propriedades hidráulicas das rochas e essas propriedades, trabalhadas ao longo do tempo geológico, permitiram o desenvolvimento de diferentes padrões de carstificação.

Visando agrupar as áreas de mesmo contexto geotectônico, com base nos mapas geológicos do estado de Minas Gerais e da Bahia (CPRM 2003 e CPRM/CBPM 2003), as regiões de ocorrência das unidades portadoras de rochas carbonáticas foram divididas em sete grandes grupos. Esses grupos serão aqui denominados domínios. Reserva-se aqui o termo subdomínio para subdivisões dos domínios, caracterizadas por empilhamentos sedimentares e padrões estruturais diferenciados.

Para o Grupo Bambuí foi utilizada como ponto de partida a divisão em compartimentos da bacia do São Francisco apresentada em Allkmin & Martins-Neto (2001). Divisões adicionais, aqui propostas, são ideias novas surgidas durante o presente estudo com base no entendimento geológico-estrutural da área e visando ao objetivo último do projeto, que é a gestão dos aquíferos cársticos.

5.2 Definição dos domínios hidrogeológicos

São descritos a seguir os domínios e subdomínios propostos, com base no empilhamento estratigráfico e nos padrões de deformação. Suas distribuições espaciais são mostradas na Figura 5.2 abaixo.

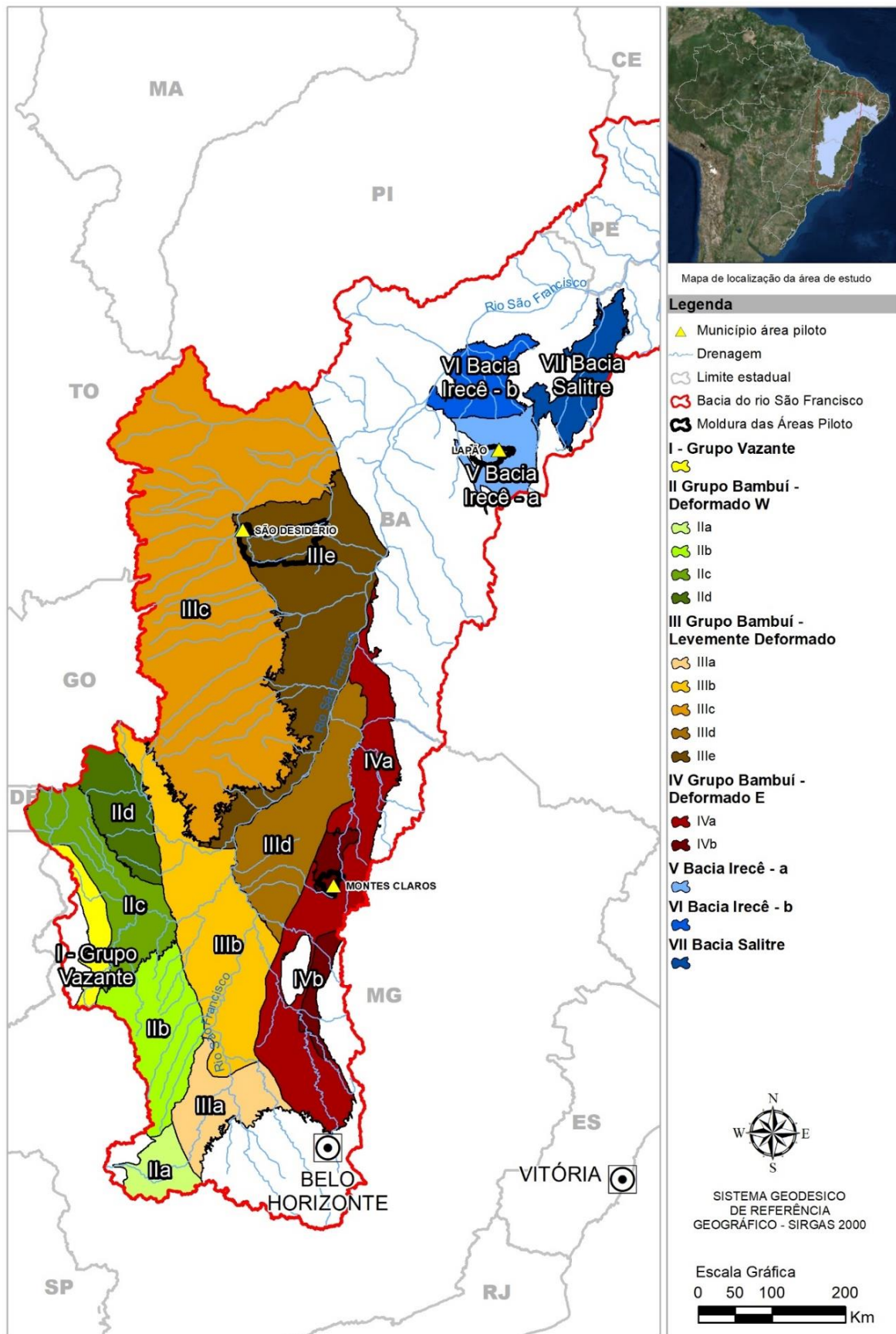


Figura 5.2: Domínios e subdomínios hidrogeológicos do carste São Francisco

5.1.3 Domínio I – Vazante

Próximo ao limite da borda oeste do cráton do São Francisco, na Faixa de Dobramentos Brasília, localiza-se o Grupo Vazante. Este grupo, que constitui o Domínio I, está em contato com o Grupo Canastra, a oeste, e com o Grupo Bambuí, a leste. Apresenta geometria alongada, com *trend* N-S. Em sua porção leste observa-se um aumento considerável da espessura dos sedimentos, gradação de unidades carbonáticas para pelitos e uma grande variação faciológica, em geral, determinada pelo ambiente paleogeográfico (Misi, 2001).

Além dessas características, as rochas do Domínio I diferem das demais pelas características estruturais, caracterizadas por uma intensa deformação dúctil e dúctil-rúptil, associada a uma tectônica convergente (com formação de empurrões, dobramentos e superfícies de foliação penetrativa), e a um sistema de falhas direcionais sinistrais e basculamentos. A região diferencia-se também pela existência de rochas e estruturas produzidas em eventos hidrotermais. Após a deformação dúctil, dúctil-rúptil e o evento hidrotermal, houve ainda uma quinta fase de deformação, com geração de estruturas rúpteis, como falhas extensionais e dois sistemas de fraturas. O hidrotermalismo, bem como as estruturas rúpteis, têm grande importância no desenvolvimento do carste na região (carste hipogênico).

5.1.4 Domínio II – Grupo Bambuí deformado W

O Domínio II foi definido como o compartimento oeste de Allkmin & Martins-Neto (2001) e corresponde à zona externa das faixas de dobramento Brasília e Rio Preto, dentro da bacia do São Francisco, no contexto do Grupo Bambuí deformado. No que diz respeito à caracterização preliminar apresentada no RP-3, o presente Domínio II engloba, de norte para sul, os então chamados subdomínios 8 e 7, além do extremo sul do então chamado Subdomínio 6. O Domínio II se caracteriza pela presença de dobras e falhas de empurrão relacionadas ou rotacionadas por sistemas transpressivos dextrais na porção norte e sinistrais na porção sul, com vários conjuntos de juntas. As estruturas alinham-se ao longo do eixo N-S, com vergência de oeste para leste, e existe uma rotação das estruturas que, localmente, eliminam a vergência. Existe uma diminuição progressiva da deformação em direção ao interior do cráton (Allkmin & Martins-Neto, 2001).

O Domínio II foi subdividido em 4 subdomínios:

- Subdomínio IIa - Corresponde à porção sudoeste do cráton do São Francisco em Minas Gerais, e engloba as cidades de Arcos, Pains, São Roque de Minas e áreas a norte de Córrego Danta. Afloram, principalmente, rochas da base do Grupo Bambuí, com porções cobertas por sedimentos cenozoicos. Apresenta uma deformação marcante, com falhas transcorrentes dextrais que rotacionam e cortam os lineamentos marcados pela direção das charneiras de dobras N-S a NNW-SSE. A sudoeste o subdomínio é limitado pelas *napes* e falhas de empurrão da faixa Brasília (grupos Paranoá e Canastra) e a leste faz contato discordante erosivo com o embasamento cristalino.

- Subdomínio IIb - Abrange as cidades de São Gotardo, Tiros, Varjão de Minas até João Pinheiro. Ocorrem áreas de afloramento de rochas intermediárias ou do topo do Grupo Bambuí sobrepostas por espessas coberturas cretáceas, especialmente os arenitos do Grupo Areado e as rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda. As rochas apresentam-se deformadas, e lineamentos marcados no relevo denotam um trend estrutural aproximadamente N-S. Falhas de empurrão de direção NE-SW e NW-SE ocorrem ao longo da área.
- Subdomínio IIc - Corresponde a uma faixa de orientação aproximada NW-SW, passando por Bocaina, Unaí, Cabeceira Grande até Formosa, em Goiás. Essa área exibe rochas deformadas do Grupo Bambuí aflorantes ou sob extensas coberturas cenozoicas. Ressalta o padrão fortemente marcado por lineamentos NW-SE, especialmente na porção norte do subdomínio.
- Subdomínio IId - Afloram essencialmente rochas siliciclásticas da Formação Três Marias, que estão cobertas, em parte, por espessas coberturas cenozoicas. Rochas pelito-carbonáticas ocorrem localmente na porção oeste, acompanhando uma zona de falha de direção NW-SE.

5.1.5 Domínio III – Grupo Bambuí Pouco Deformado

Corresponde ao compartimento central de Allkmin & Martins-Neto (2001), e inclui a porção da bacia onde as rochas do Supergrupo São Francisco não apresentam deformações significativas. É o maior domínio definido no presente relatório, incluindo as áreas definidas no RP-3 como subdomínios 2 (Urucuia), 4 (Bambuí Ocidental) e porção oeste do subdomínio 5 (Bambuí Oriental). O Domínio III se inicia no centro-sul de Minas Gerais e vai até o norte da Bahia, constituindo uma vasta superfície onde predominam os arenitos e pelitos da Formação Três Marias e os arenitos cretáceos do Grupo Urucuia. Ocorrem, em menor proporção, no flanco oeste do rio São Francisco, sedimentos carbonatados do Grupo Bambuí. Acompanhando o sopé das escarpas orientais do Urucuia e servindo-lhe de pedestal, desde o rio Carinhanha, ao norte, até Januária, ao sul, numa extensão de 150 km, chama atenção uma notável área de exposição da Formação Sete Lagoas, não verificada nos demais domínios. De acordo com Iglesias & Uhlein (2009), essa exposição pode estar associada a um provável alçamento de parte do flanco oeste do Rio São Francisco, que fez aflorar aí de forma conspícua a Formação Sete Lagoas.

O Domínio III foi dividido em cinco subdomínios, definidos da seguinte forma:

- Subdomínio IIIa - Ocupa a porção centro-sul do domínio em Minas Gerais, indo das cidades de Lagoa da Prata e Luz até Morada Nova de Minas. Caracteriza-se pela presença marcante de pelitos da Fm. Serra de Santa Helena e rochas do Subgrupo Paraopeba cobertas por sedimentos cenozoicos.
- Subdomínio IIIb - Corresponde à zona marcada pela presença dos arenitos e pelitos da Formação Três Marias, com áreas marcadas pelas rochas cretáceas do Grupo Areado e mais raramente do Grupo Mata da Corda. Engloba cidades no centro-norte de Minas Gerais, como Três Marias,

Pirapora, Santa Fé de Minas, Riachinho, prolongando-se até 175 km a norte.

- Subdomínio IIIc - Abrange a área de predominância das rochas do Grupo Uruçuia, no norte de Minas e toda a área do extremo sudoeste e noroeste da Bahia. Na área, as rochas carbonáticas estão em profundidade, não havendo evidências de estruturas cársticas em superfície.
- Subdomínio III d - Abrange os terrenos não deformados a pouco deformados do Grupo Bambuí aflorantes na margem direita do rio São Francisco. Apresenta áreas de calcários expostos com muitas feições cársticas em superfície. Abrange as cidades de Coração de Jesus, Brasília de Minas, Japonvar, Varzelândia, Jaíba e Iuiú.
- Subdomínio III e - Abrange os terrenos não deformados a pouco deformados do Grupo Bambuí aflorantes na margem esquerda do rio São Francisco, partindo do norte de Minas, adentrando no estado da Bahia até a cidade de Baianópolis. Também apresenta áreas de calcários expostos do Grupo Bambuí com muitas feições cársticas em superfície. Abrange as cidades de Januária, Itacarambi, São João das Missões, Serra do Ramalho, Brejolândia e Baianópolis.

5.1.6 Domínio IV – Grupo Bambuí deformado E

Abrange uma faixa alongada e estreita que atravessa a porção central de Minas Gerais até o sul da Bahia, englobando as localidades de Sete Lagoas, Curvelo, Montes Claros, Janaúba e Bom Jesus da Lapa. Corresponde ao compartimento estrutural leste da bacia do São Francisco definida por Allkmin e Martins-Neto (2001), onde afloram rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí. Este Domínio III corresponde, na caracterização preliminar apresentada no RP-3, a parte do subdomínio 6 e à porção mais oriental do subdomínio 5.

Apresenta como características principais a presença de deformação pela influência da faixa de dobramentos Araçuaí, com dobramentos e foliação indicando esforços de leste para oeste. Segundo os autores acima citados, toda a deformação da cobertura pré-cambriana é isolada do embasamento por um deslocamento basal, que aflora ao longo de todo o limite sul do compartimento e também em várias janelas estruturais no interior do cinturão. Outra característica marcante desse domínio é a presença de uma clivagem plano-axial cuja expressão e penetrabilidade aumentam progressivamente em direção a leste. A mesma tendência observa-se para o metamorfismo das rochas, que é observado principalmente no extremo leste do domínio.

O domínio foi subdividido em duas partes:

- Subdomínio IVa - Abrange as áreas mapeadas como Subgrupo Paraopeba indiviso, aflorante ou sob coberturas cenozoicas.
- Subdomínio IVb - Reúne áreas de afloramentos dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré, que se apresentam mais intensamente deformados.

5.1.7 Domínio V – Bacia de Irecê muito deformada

A Bacia de Irecê localiza-se no norte do Cráton do São Francisco, no estado da Bahia, e reúne rochas metassedimentares neoproterozoicas pertencentes ao Grupo Una. Nesta região, os metassedimentos do Grupo Una assentam-se sobre as rochas do Supergrupo Espinhaço, representado pelos grupos Paraguaçu e Chapada Diamantina e pela Formação Morro do Chapéu. A unidade carbonática principal é a Formação Salitre. Na área, as rochas carbonáticas encontram-se expostas ou cobertas por solos eluvionares ou coluvionares.

A porção da bacia de Irecê que está localizada dentro da área da bacia hidrográfica do rio São Francisco pode ser dividida em duas partes. A porção mais deformada da bacia de Irecê localiza-se a sul, onde as unidades mapeadas conformam um arranjo geométrico em “V”. Essa geometria reflete um interessante arranjo estrutural que pode ser explicado pela interação de esforços compressivos atuantes ao longo do ciclo brasileiro. No mapa geológico, observa-se um conjunto de falhas de empurrão de traço leste oeste, levemente abaulados, e lineamentos que marcam dobramentos.

As características estruturais marcantes desse domínio são a heterogeneidade da deformação, com zonas de concentração da deformação onde se observam dobras apertadas, muito comumente isoclinais, vergentes preferencialmente para S que ocorrem próximas aos falhamentos (Kuchenbecker *et al*, 2011). Os planos axiais das dobras apresentam mergulhos médios a altos, preferencialmente para N, causando a verticalização de S_0^2 em diversos locais. Em campo, verifica-se acentuada acilindricidade destas dobras, que pode ter sido intensificada por dobramentos posteriores. Em outras áreas, entretanto, observam-se os estratos sub-horizontais e sem dobramentos visíveis.

A área do Domínio V engloba as cidades de Jussara, Irecê, Lapão, Ibipeba e Cafarnaum.

5.1.8 Domínio VI – Bacia de Irecê pouco deformada

Ao norte da cidade de Jussara, a configuração das unidades geológicas da Bacia de Irecê é diferente da configuração na porção sul. Os metassedimentos neoproterozoicos não se apresentam mais confinados entre as unidades mais antigas, e não se observa na trama estrutural a mesma intensidade de dobramentos e falhas na direção EW que se observa na porção sul. Outra mudança marcante é a existência de uma extensa cobertura cenozoica que cobre completamente os calcários da Unidade Jussara (CPRM/CBPM, 2003).

5.1.9 Domínio VII – Bacia Salitre

O domínio VII localiza-se no norte do estado da Bahia e engloba as áreas a sul de Juazeiro até a cidade de Várzea Nova. Reúne ocorrências de rochas neoproterozoicas, estando entre elas, as unidades calcárias Unidade Nova

² S_0 = plano de acamamento

América, Unidade Gabriel e Unidade Jussara, do Grupo Una. Essas unidades afloram principalmente em uma faixa NNE-SSW, entre unidades metassedimentares mesoproterozoicas e rochas cristalinas de idade paleoproterozoica.

5.2 Aquíferos nos subdomínios

Após a caracterização dos domínios e subdomínios o passo seguinte é classificar os diferentes aquíferos, nos subdomínios, quanto à litologia e quanto à presença ou ausência de coberturas.

No que diz respeito à litologia são consideradas três categorias:

- Aquífero cárstico – para as unidades onde há predominância de rochas carbonáticas com feições cársticas exemplares;
- Aquífero cárstico-estratificado – para casos onde há entre as rochas carbonáticas intercalações frequentes de pelitos ou margas (Ex.: Formação Lagoa do Jacaré);
- Aquífero não cárstico – unidades não carbonáticas ou com presença de rochas carbonáticas totalmente cobertas, localizadas em profundidade, abaixo do nível de base regional.

Para a classificação quanto à presença de coberturas, que tem grande influência nos processos de recarga e nas formas de carstificação, são também definidas três categorias:

- Carste exposto ou sub-superficial;
- Presença de cobertura cenozoica;
- Presença de cobertura cretácea.

Combinando as diferentes categorias acima indicadas, é criada a classificação das unidades cársticas, as quais podem ser descritas como:

- a) carste exposto;
- b) carste coberto por unidades cretáceas;
- c) carste coberto por sedimentos cenozoicos;
- d) carste estratificado exposto;
- e) carste estratificado coberto por unidades cretáceas;
- f) carste estratificado coberto por sedimentos cenozoicos;
- g) unidade não cárstica.

Em geral, os sistemas porosos e cársticos são os sistemas mais promissores para aproveitamento da água subterrânea, já que ocorrem em terrenos onde a água da chuva pode infiltrar e ser armazenada, fluindo com velocidade mais elevada ao longo do maciço rochoso, participando dos processos de recarga dos sistemas fluviais e dos grandes corpos aquíferos em profundidade.

A existência desse arranjo hidrogeológico implica em uma modalidade de correlação entre os componentes superficial e subterrâneo, onde o comportamento sazonal dos volumes escoados nos períodos de estiagem ajusta-se a um padrão típico de esgotamento, caracterizando-se assim,

domínios homogêneos quanto às tipologias aquíferas existentes e seu reflexo nas formas específicas em que se manifestam os hidrogramas de escoamento superficial.

Dentro desse espaço, os esforços para o entendimento da dinâmica hídrica visando compreender a integração das parcelas subterrâneas e superficiais, de modo mais realista e incisivo, passam pela análise dos seguintes fatores:

- capacidade intrínseca de armazenamento, definido pela distribuição dos vazios dentro dos maciços rochosos e depósitos inconsolidados;
- formas de interconexão hidráulica entre os distintos sistemas hidrogeológicos, onde estão refletidos de forma contundentes os atributos estruturais herdados ao longo da evolução geológica dos terrenos, e
- os atributos responsáveis pela maior ou menor capacidade de trânsito, onde se destacam as condições climáticas favoráveis ao aporte pluviométrico e ao gradiente hidráulico.

Tendo em vista tais fatores, é nítida a diferenciação existente em grande parte dos limites da BSF:

1ª) as formas de relevo que se expressam em todas as suas porções do extremo norte, noroeste e nordeste, configuram um cenário em que os maciços mais elevados presentes nessa porção estão fragmentados, isolados e não compreendem massas rochosas potentes e nem contrastes altimétricos consideráveis que possam acomodar grandes descontinuidades, ressaltando ainda que a volumetria pluviométrica é incipiente e, em termos de balanço hídrico pouco expressiva. Portanto, tais áreas refletem ambientes de pouca significância quanto ao trânsito de fluxos subterrâneos, a não ser em nível muito localizado.

2ª) as formas de relevo situadas ao sul e a sudoeste se conformam, distintamente, a partir de relevos exteriores bastante contínuos, em extensas massas rochosas contíguas aos limites topográficos da BSF. Isso se traduz na presença de um potencial elevado tanto de contrastes altimétricos como em ambientes de significativa capacidade ao trânsito de fluxos subterrâneos em escala regional, domínios estes em que se encontram agregados os maiores índices pluviométricos regionais, ao redor da BSF.

3ª) as formas de relevo caracterizadas pela grande descontinuidade que se conforma a oeste do Chapadão Urucuia e, naturalmente, a oeste da BSF, é um caso didático de como a abrupta ruptura de relevo, marcada ao longo dos contrafortes da Serra Geral de Goiás vem implicar em uma condição de favorecimento de exportação de água de uma bacia vizinha. Breves estudos comparativos indicam entre os valores de vazão subterrânea específica o ganho de aportes provenientes dos arenitos Urucuia, ao se avaliar as

descargas específicas dos ambientes aquíferos que se conformam no sopé da referida serra, zona de cabeceira das drenagens tributárias da bacia dos rios Tocantins-Araguaia. Isso é retomado adiante com maiores detalhes sobre a avaliação das descargas específicas em ambos os compartimentos.

Como dito anteriormente, as características de porosidade intrínseca dos maciços precisam ser relacionadas também as condições estruturais, geomorfológicas e climáticas que regulam o aporte de água e o potencial de descarga desses sistemas. Essa análise é fundamental para análise da dinâmica hídrica em escala regional, como no caso de uma bacia de grande dimensão como a do rio São Francisco.

6 Análise das cargas hidráulicas

O fluxo de água subterrânea em ambientes cársticos ocorre preferencialmente ao longo de condutos e zonas de dissolução em geral, de forma não previsível pela Lei de Darcy. Dessa maneira, é imprópria, nesses ambientes, a consideração “*strictu senso*” dos parâmetros hidrodinâmicos condutividade hidráulica, transmissividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. Assim, embora seja possível a interpolação de isolinhas de carga hidráulica, o mapa potenciométrico não aproxima satisfatoriamente o fluxo subterrâneo real.

Para contornar este problema, tentou-se uma análise calcada na conceituação de superfície potenciométrica como uma função do tipo $Z = f(x,y)$. Segundo Feitosa & Filho (2008), superfície potenciométrica é “uma superfície, referida a uma dada profundidade, que inclui todos os pontos definidos por valores de cargas hidráulicas.” A concepção de superfície potenciométrica e da abordagem adotada é mostrada na Figura 6.1. Nesta figura, o plano XY deve ser considerado como um plano horizontal no seio do aquífero.

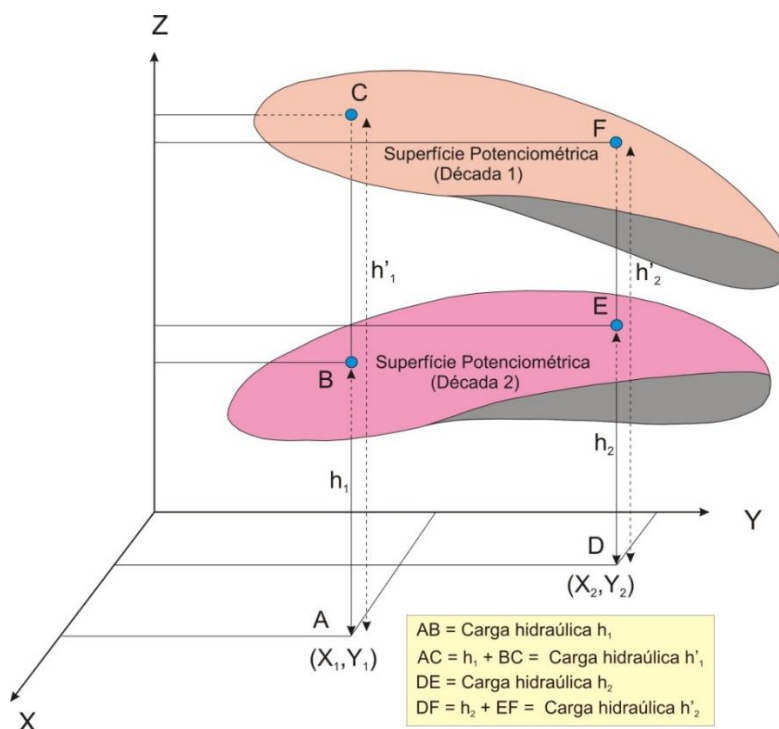


Figura 6.1: Superfícies potenciométricas e abordagem adotada. Modificado de Feitosa & Filho (2008)

No caso de aquíferos livres as superfícies acima mostradas descrevem aproximadamente a configuração do freático. No caso de aquíferos confinados ou semiconfinados elas constituem superfícies virtuais que se desenvolvem acima do topo do aquífero ou, em se tratando de aquíferos jorrantes, acima da superfície do terreno.

6.1 Organização dos dados

O procedimento adotado para a organização dos dados para análise das cargas hidráulicas é descrito abaixo:

- Organização do Banco de Dados - O cadastro final do projeto, com 23.543 poços foi consistido para permitir a utilização de pesquisas e filtros.
- Obtenção das cotas – O banco único de dados, acima citado, foi incorporado ao SIG. Neste banco, foram identificados inicialmente 1682 poços com identificação de nível estático NE e respectiva data. As cotas desses poços foram em seguida obtidas a partir de imagens SRTM.
- Obtenção das cargas hidráulicas - A carga hidráulica de cada um dos 1.682 poços foi obtida subtraindo-se o nível estático da respectiva cota de superfície.
- Separação das cargas hidráulicas por década – Foram consideradas, nessa separação, as datas de obtenção dos níveis estáticos dentro de uma dada década. Esses níveis foram medidos geralmente no teste de produção, realizado imediatamente após a perfuração. Assim sendo, os poços considerados numa dada década não o foram na década anterior

nem na seguinte. As cargas hidráulicas são, portanto, valores pontuais escalonados no tempo e no espaço, dentro da década considerada. Dentro de outra década têm-se outros valores pontuais nela escalonados, também no tempo e no espaço. As superfícies potenciométricas representam, assim, o comportamento médio das cargas hidráulicas na área e na década consideradas. Foram eleitas as nove décadas abaixo mostradas³:

- 1931 – 1940;
 - 1941 – 1950;
 - 1951 – 1960;
 - 1961 – 1970;
 - 1971 – 1980;
 - 1981 – 1990;
 - 1991 – 2000;
 - 2001 – 2010;
 - 2011 – 2014.
- O passo seguinte foi a distribuição da carga hidráulica por faixas de variação. As faixas consideradas foram as seguintes:
 - 350 a 500 metros;
 - 501 a 600 metros;
 - 601 a 700 metros;
 - 701 a 800 metros;
 - 801 a 1200 metros.
 - Ao longo das primeiras análises, realizadas para as 1.682 cargas hidráulicas selecionadas, as seguintes constatações foram feitas:
 - Em muitos poços, no banco de dados, era possível a obtenção da carga hidráulica, embora os mesmos não tivessem registrada a data da medição do nível estático;
 - As cargas hidráulicas desses poços ficavam sempre, em todas as décadas, dentro da faixa de variação de carga hidráulica de eventuais poços próximos, onde eram conhecidas carga e respectiva data.
 - Diante dessas constatações decidiu-se atribuir aos poços com apenas informação de carga hidráulica a data da sua perfuração, mesmo porque os testes de produção são comumente executados logo após a perfuração do poço.
 - Levando-se em conta as constatações acima colocadas, uma nova busca e filtragem no banco de dados permitiu passar de 1.682 para 14.785 o total de poços com registro de carga hidráulica e respectiva data. Esse número fica mais representativo para a análise da evolução temporal e espacial das cargas hidráulicas que se pretende fazer.

³ Neste estudo a superfície potenciométrica referente à década de 1940 é gerada a partir de todas as cargas potenciométricas obtidas entre 1931 e 1940. Analogamente, a superfície potenciométrica referente à década de 1950 é gerada a partir de todas as cargas potenciométricas obtidas entre 1941 e 1950. E assim sucessivamente.

6.2 Análise dos dados

A análise dos dados foi feita por década e os seguintes procedimentos foram:

- Buscou-se correlacionar as cargas hidráulicas à pluviometria;
- Buscou-se analisar a diferença entre a superfície potenciométrica **n** e a superfície potenciométrica **n-1**, ou seja, entre cada década e a década seguinte. Cada uma dessas diferenças é constituída por um conjunto de diferenças de carga hidráulica.

6.2.1 Correlação cargas hidráulicas x pluviometria

Foram elaborados, por década, mapas de distribuição da carga hidráulica para toda a área de estudo. Esses mapas, tendo como fundo os subdomínios, são mostrados na Figura 6.2. O tamanho do símbolo que representa as cargas hidráulicas é proporcional ao valor das mesmas. Assim, quanto maior o diâmetro do símbolo, maior a carga hidráulica, e vice-versa. Isso foi assim feito para prover uma fácil visualização qualitativa das cargas hidráulicas.

Gráficos da média pluviométrica mensal da década foram dispostos sob os mapas de carga hidráulica, na Figura 6.2, para possibilitar a percepção de possíveis correlações chuva x carga hidráulica.

O procedimento acima descrito visou a verificar se os rebaixamentos regionais do nível d'água (menores cargas hidráulicas) estariam relacionados a intensificações de perfurações para o atendimento de demandas não supridas por fracas pluviometrias.

6.2.2 Análise pluviométrica regional

Uma tentativa de compreensão do comportamento regional das chuvas, em toda a área do carste São Francisco, consistiu na análise, por década, do comportamento das médias anuais. Para tanto, foram geradas superfícies pluviométricas para cada década, por meio de interpolação IDW (configuração default).

Os resultados obtidos, mostrados na Figura 6.3, evidenciam o seguinte:

- Baixas pluviometrias persistentes na região nordeste do carste São Francisco, onde as médias anuais ficam abaixo de 500 mm. Essa escassez hídrica se acentua a partir da década de 1980, persistindo até os dias atuais. Na chamada Bacia de Irecê, área de ocorrência do Aquífero Salitre, a escassez hídrica é mais acentuada e persistente em toda a série histórica aqui analisada. As médias anuais das décadas, aqui, ficam em torno dos 400 mm;
- No extremo oeste e em toda a porção centro-sul do carste São Francisco, o regime pluviométrico revelou-se mais uniforme e mais generoso, em todas as décadas analisadas, com médias anuais que podem chegar a 1200 mm.

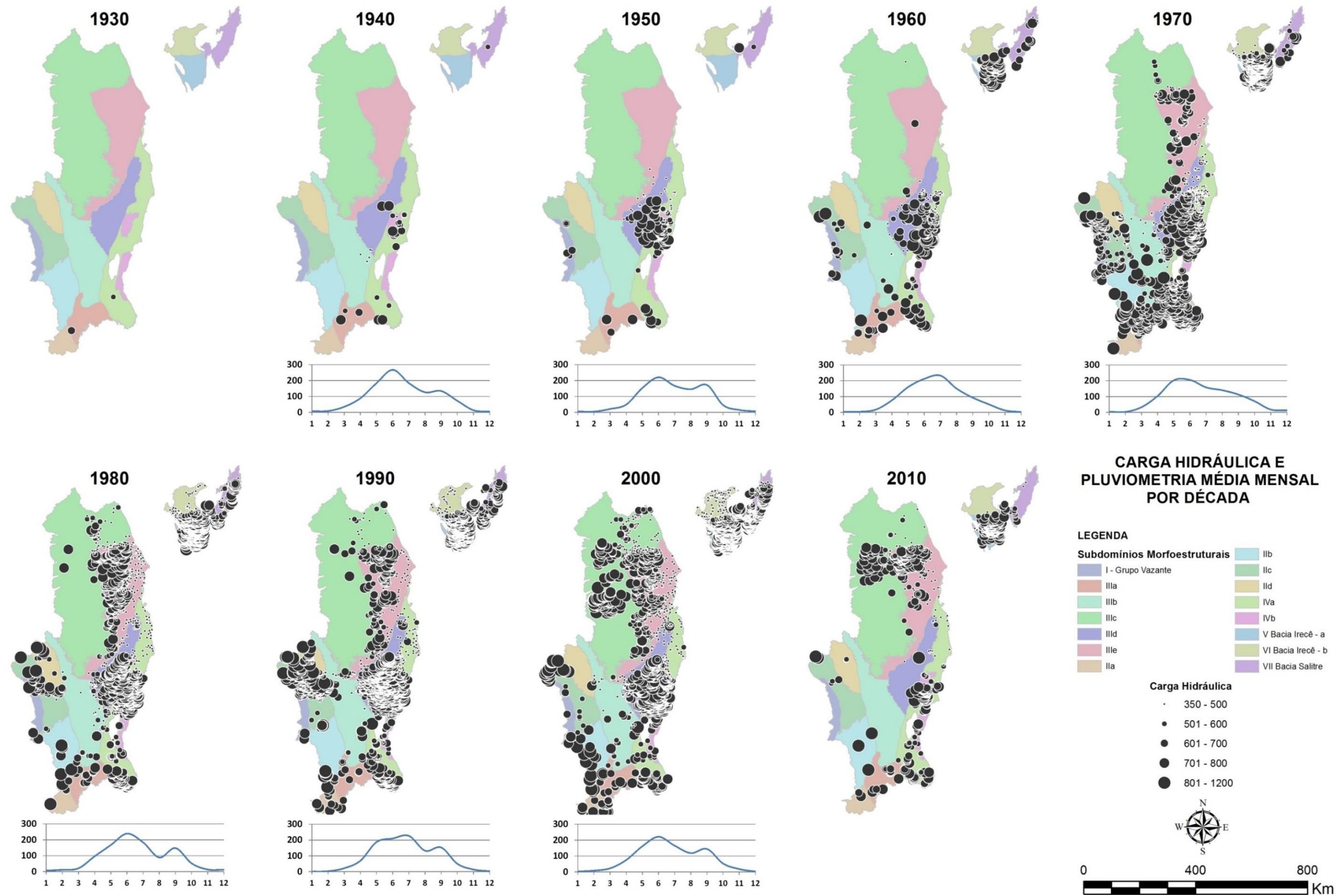


Figura 6.2: Cargas hidráulicas e pluvimetria média mensal por década.

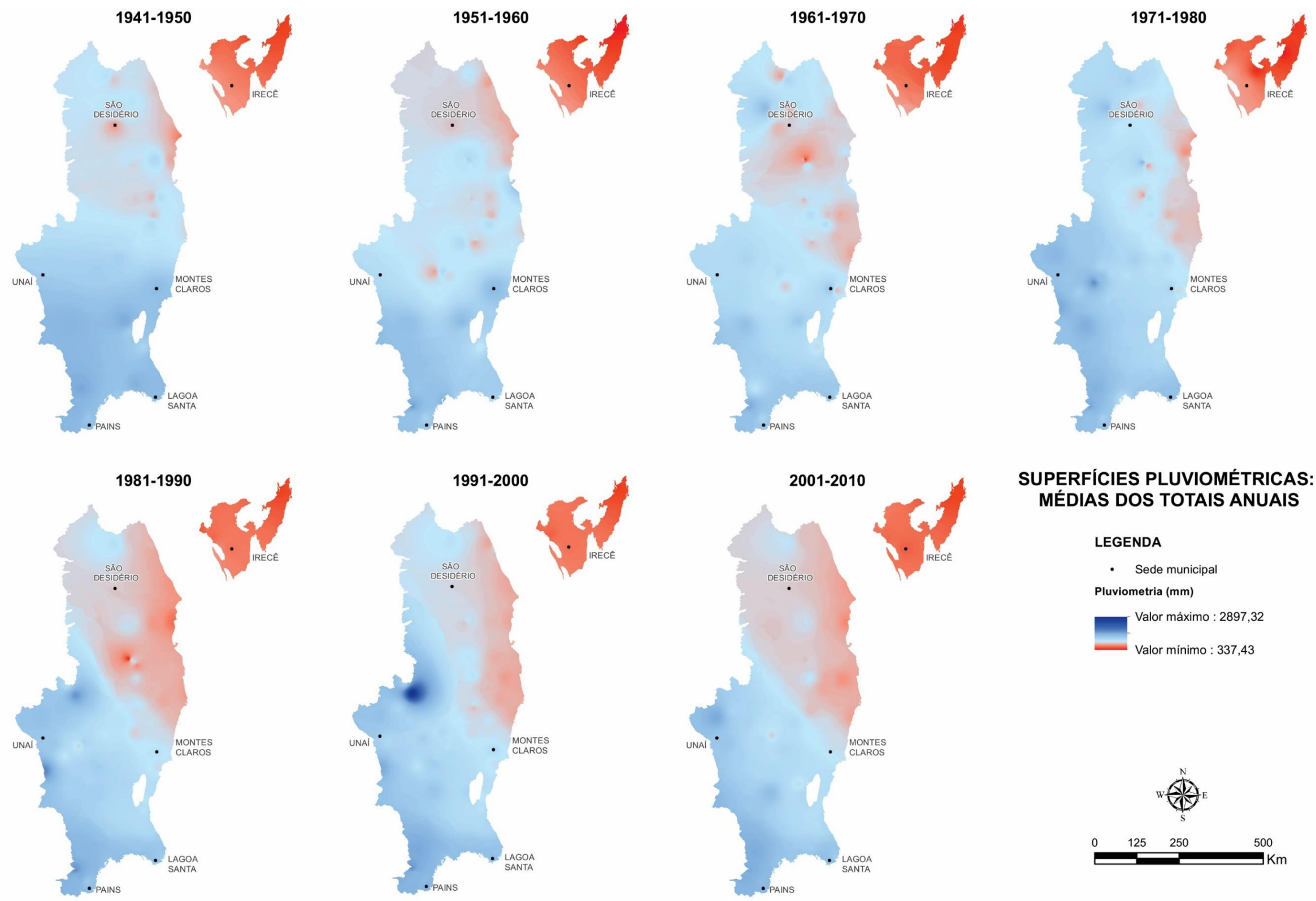


Figura 6.3: Superfícies pluviométricas: médias dos totais anuais.

6.2.3 Superfícies potenciométricas

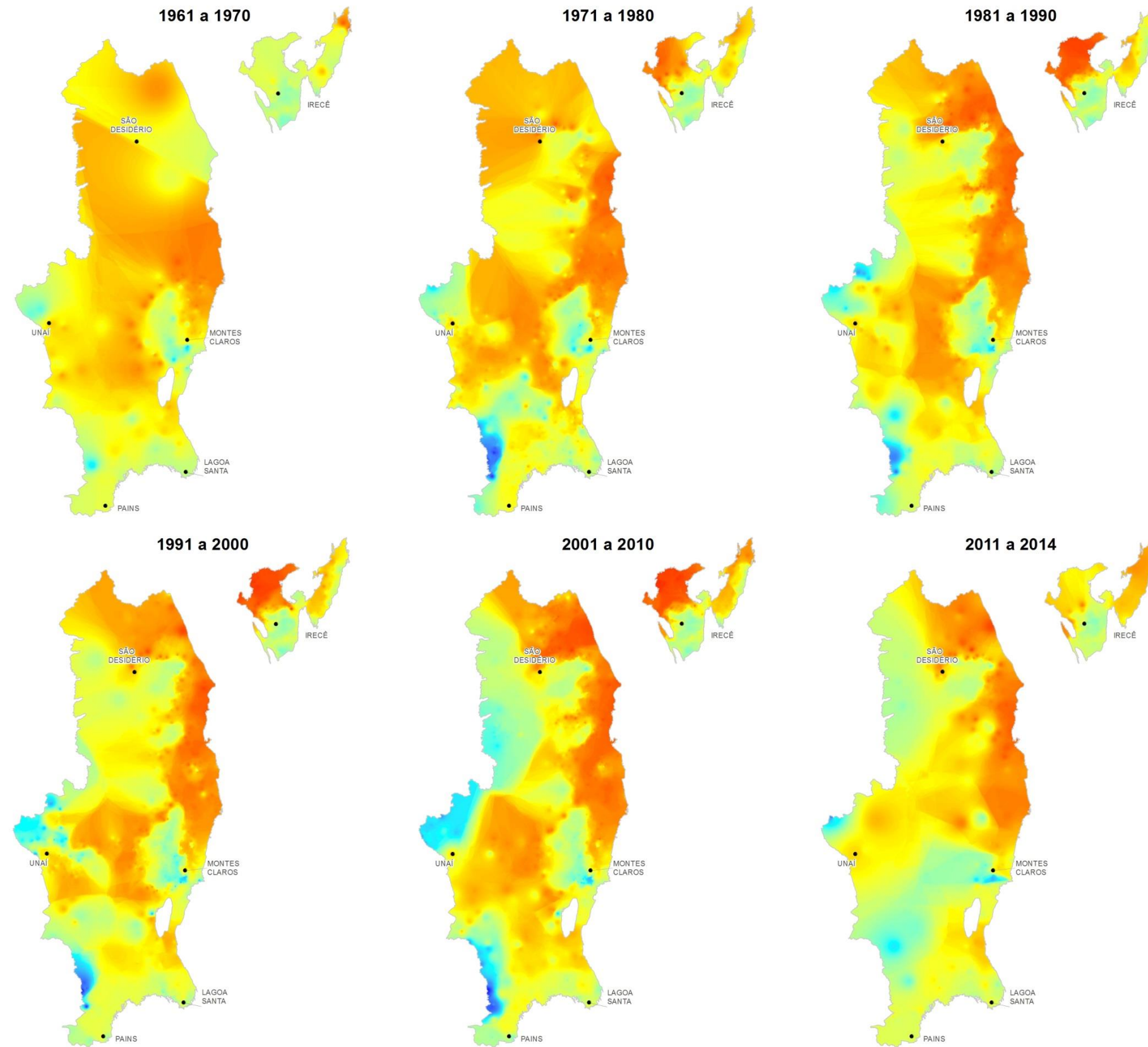
Superfícies potenciométricas, tais como acima definidas na Figura 6.3 foram geradas para cada década por interpolação IDW (configuração default). Os resultados são mostrados na Figura 6.4, onde as seguintes considerações são pertinentes:

- Nas três primeiras décadas (1930, 1940 e 1950), não foi possível gerar superfícies potenciométricas, devido à carência de informações. Poucos poços foram perfurados nessas décadas e, conseqüentemente, poucas as cargas hidráulicas disponíveis;
- A partir da década de 1960 e, mais marcadamente a partir da década de 1970, a superfície potenciométrica começa a mostrar diferenciações mais acentuadas, em função da maior densidade de dados;
- As maiores cargas hidráulicas estão sempre associadas às maiores cotas topográficas, o que é um comportamento normal. Cita-se como exemplo, na Figura 6.4, a Bacia de Irecê situada em cotas semelhantes às do chapadão do Urucuia (cerca de 800 metros); a região de Unaí, no extremo noroeste do estado de Minas Gerais (cotas em torno dos 650 metros); e a região de Montes Claros (cotas no entorno dos 600 metros);
- Não se percebem efeitos de bombeamento, naturalmente, dada a escala utilizada.

Com a finalidade de validar as cargas hidráulicas calculadas foi realizado um comparativo entre a superfície potenciométrica gerada para a década de 2010 e as cargas hidráulicas obtidas durante a campanha de coleta ocorrida em agosto de 2014. As cotas dos poços amostrados foram obtidas também a partir de imagens SRTM 90.

Foi utilizado o método estatístico do erro médio quadrático para o cálculo do erro do ajuste. O RMSE (*Root Mean Square Error*) encontrado foi de 36,11 metros (Figura 6.5). O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados

Observou-se que as maiores diferenças entre os valores gerados e os medidos ocorrem nas bordas da superfície. Essa diferença se deve, na maioria das vezes, à ausência de informações nessas áreas.

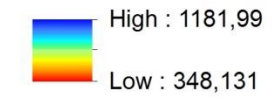


SUPERFÍCIES POTENCIOMÉTRICAS POR DÉCADAS

LEGENDA

- Sede municipal

Carga Hidráulica (m)



SUBDOMÍNIOS

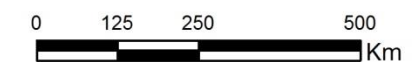
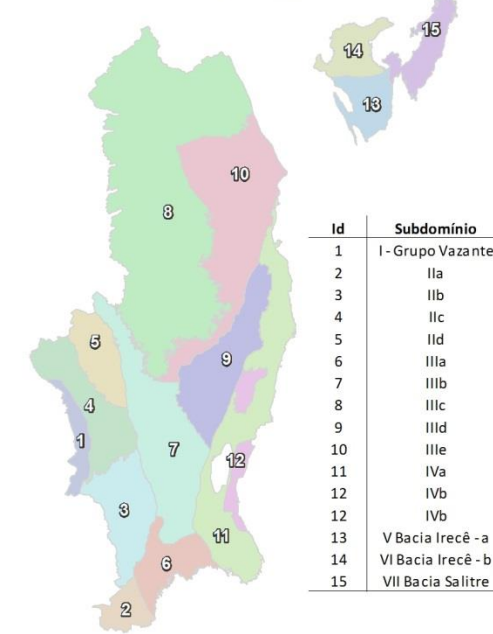


Figura 6.4: Superfícies potenciométricas por décadas.

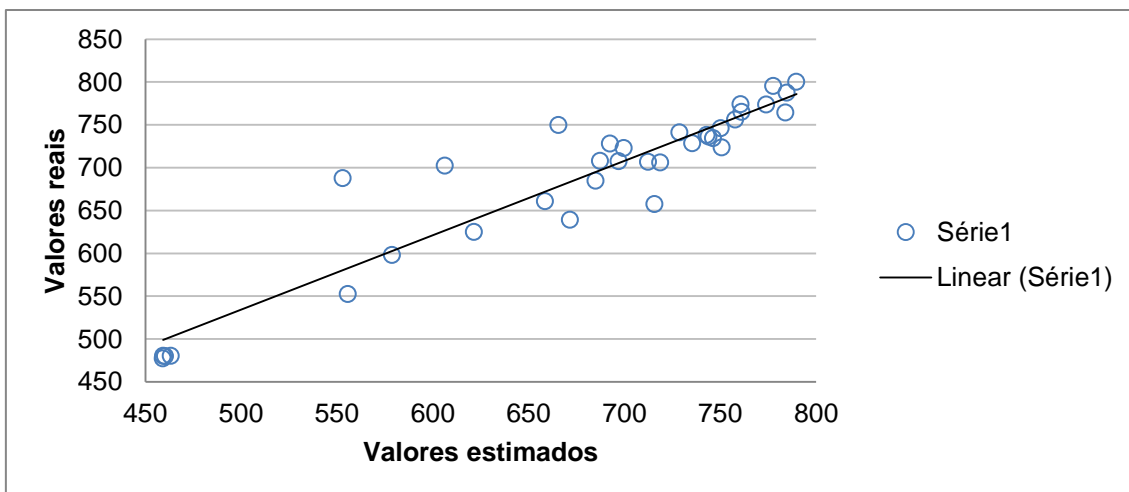
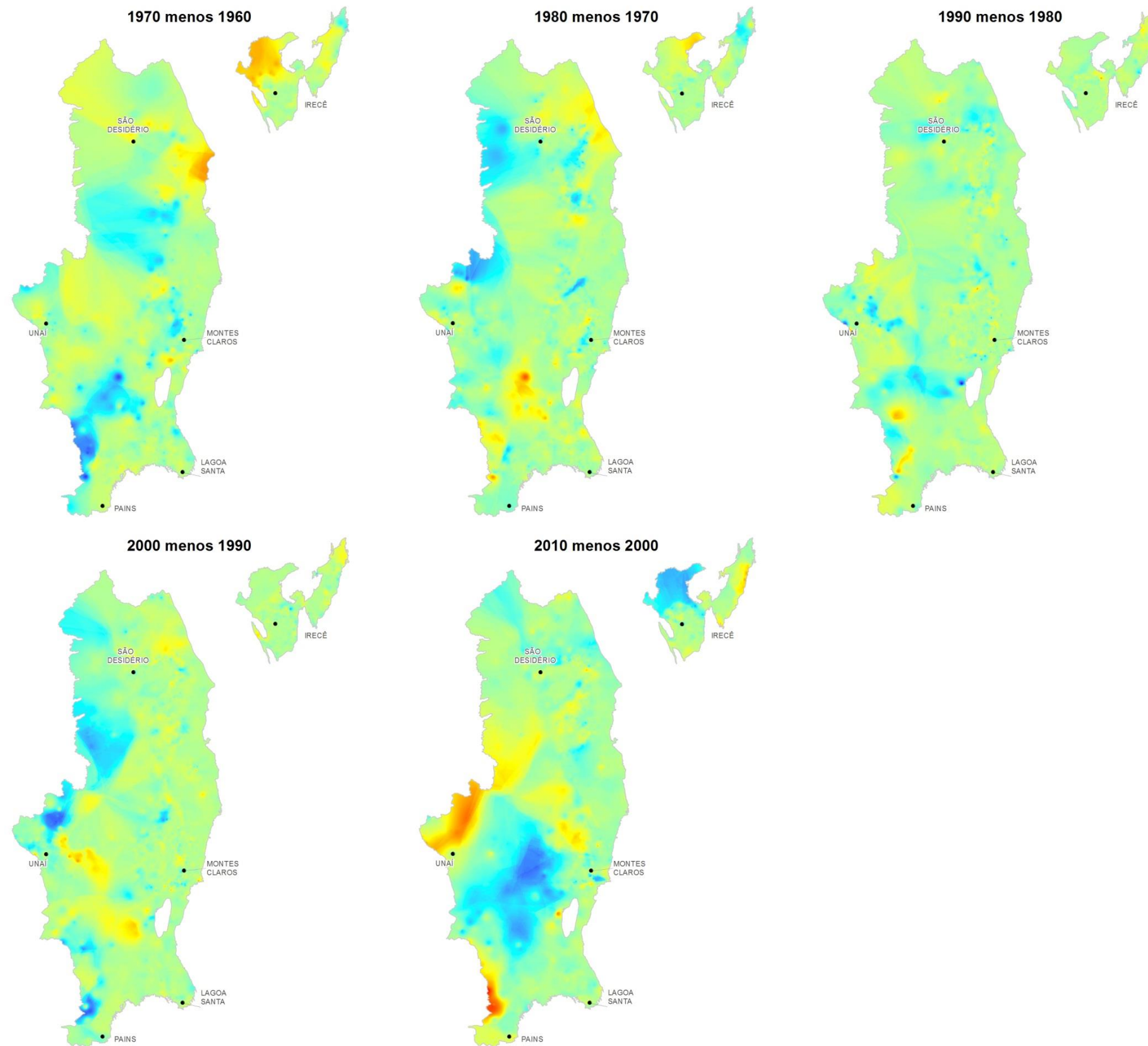


Figura 6.5: Correlação carga hidráulica gerada x carga hidráulica observada.

6.2.4 Diferença entre superfícies potenciométricas - Regional

Foi calculada a diferença entre a superfície potenciométrica de cada década e a superfície potenciométrica da década imediatamente anterior (superfície da década 2010 menos a superfície da década 2000; superfície da década 2000 menos a superfície da década 1990; e assim sucessivamente). Cada diferença entre superfícies potenciométricas é representada por um conjunto de diferenças de carga hidráulica passível de zoneamento.

Na Figura 6.6 são mostrados zoneamentos de diferenças de cargas hidráulicas para as cinco décadas selecionadas.



ZONEAMENTO DE DIFERENÇAS DE CARGAS HIDRÁULICAS PARA CINCO DÉCADAS

LEGENDA

• Sede municipal

Diferença de Carga Hidráulica (m)

Valor máximo : 444,708

Valor mínimo : -460,115

SUBDOMÍNIOS

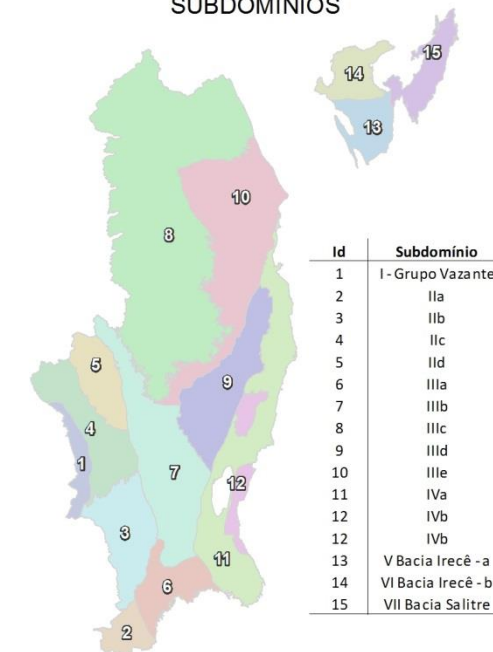


Figura 6.6: Zoneamento de diferenças de cargas hidráulicas para oito décadas.

Dentre os cinco zoneamentos de diferenças de carga hidráulica (Δh), três se revelaram coerentes e informativos, provavelmente em função de um maior número de poços e de uma distribuição espacial mais homogênea. Esses zoneamentos foram os seguintes:

- Zoneamento das diferenças de carga hidráulica Δh obtidas subtraindo-se a superfície potenciométrica correspondente à década de 1980 da superfície potenciométrica correspondente à década de 1970;
- Zoneamento das diferenças de carga hidráulica Δh obtidas subtraindo-se a superfície potenciométrica correspondente à década de 1990 da superfície potenciométrica correspondente à década de 1980;
- Zoneamento das diferenças de carga hidráulica Δh obtidas subtraindo-se a superfície potenciométrica correspondente à década de 2000 da superfície potenciométrica correspondente à década de 1990.

Zoneamento das diferenças Δh 2000 -1990 - O mapa que mostra essas diferenças de carga é apresentado no ANEXO 1.1 Chama a atenção, em toda a área de ocorrência do Grupo Bambuí (estados de Minas Gerais e Bahia) a predominância de valores Δh negativos. Esta predominância pode ser explicada por um rebaixamento regional do freático, que vem ocorrendo gradativamente desde meados da década de 1980. Esse rebaixamento regional do freático pode estar associado a uma gradativa diminuição dos volumes decenais precipitados, conforme amostrado nas estações INMET 83236 (Barreiras/BA) e INMET 83182 (Irecê/BA), mostradas na Figura 6.7, agravada por um crescente aumento da descarga bombeada.

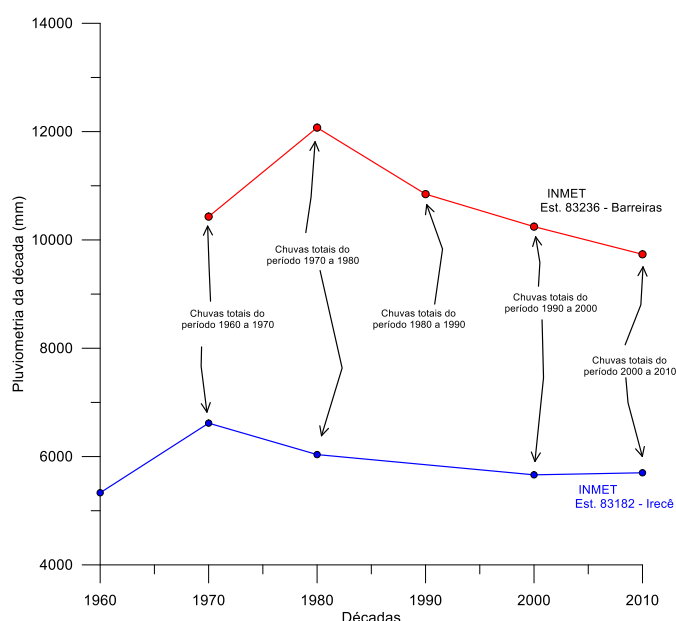


Figura 6.7: Precipitação por décadas – Barreiras/BA (Fonte: INMET).

Zoneamento das diferenças Δh 1990 – 1980 - O mapa que mostra essas diferenças de carga é apresentado no ANEXO 1.2. Observa-se já uma perceptível tendência a valores negativos em toda a área de ocorrência do Grupo Bambuí nos estados da Bahia e de Minas Gerais, a exemplo do que

ocorre na década seguinte (2000 – 1990). Aqui, entretanto, destacam-se duas áreas onde predominam valores positivos. Essas áreas são as seguintes:

- Uma faixa que se inicia nos sedimentos Urucuia, imediatamente a WSW da cidade de Barreiras, correndo para NNE até a Serra do Estreito. De Barreiras para NNE essa faixa se desenvolve sobre coberturas detríticas indiferenciadas que capeiam, provavelmente, rochas do embasamento Proterozoico;
- Grande área ao norte e noroeste da cidade de Três Marias na região sul do estado de Minas Gerais. Esta área, com altas cotas na faixa dos 700 metros, é ocupada predominantemente por sedimentos arenosos não cársticos da Formação Três Marias e da Formação Areado do Cretáceo.

O comportamento acima descrito, bem como o comportamento do Δh 2000 - 1990, parece apontar na direção de um fluxo subterrâneo mais rápido nos sedimentos cársticos, contra um fluxo bem mais lento nos sedimentos arenosos. Assim, os aquíferos cársticos entraram rapidamente num regime de recessão, respondendo rapidamente às quedas pluviométricas que ocorreram ao longo da década de 1990. As cargas hidráulicas regionais resultantes se tornaram, assim, menores que as cargas hidráulicas estabelecidas ao longo da década anterior, o que resultou em valores regionais negativos para a diferença (Δh 1990 – 1980).

Nos aquíferos cársticos/arenosos, por outro lado, é lenta a descarga e também a recarga. Esta última, em particular, permaneceu ativa ao longo da década de 1990⁴, o que resultou em cargas hidráulicas regionais mais elevadas para a diferença (Δh 1990 – 1980). Isso explica as zonas de predominância de valores Δh positivos acima indicadas.

Zoneamento das diferenças Δh 1980 – 1970 - Da década de 1970 para a década de 1980 houve um expressivo aumento do volume decenal precipitado, a julgar pela amostragem representada pela estação INMET de Barreiras (Figura 6.7).

O mapa que mostra as diferenças de carga hidráulica entre essas décadas é apresentado no ANEXO 1.3. Grandes áreas do Grupo Bambuí, bem como expressivas áreas do Grupo Urucuia mostram ocorrência de Δh positivos. Admite-se que essas áreas tenham respondido ao grande volume precipitado ao longo da década de 1980. A pluviometria decenal total, nessa década, foi, com efeito, de 12073,8 mm.

6.3 Considerações sobre a abordagem adotada

A análise das cargas hidráulicas regionais do Carste São Francisco com o auxílio de superfícies potenciométricas decenais, conceituadas na Figura 6.1,

⁴ No presente texto, década 1990 designa os dez anos anteriores, isto é, de 1981 a 1990, e assim, sucessivamente.

revelou-se promissora. Embora tenham sido utilizadas apenas duas estações pluviométricas, em Barreiras/BA e Irecê/BA, os resultados obtidos sugerem regionalmente respostas coerentes às variações climáticas. Comportamentos distintos se manifestam nos aquíferos cársticos e nos aquíferos porosos, atribuídos às respectivas velocidades de fluxo. Enquanto nos aquíferos porosos a sensibilidade às variações climáticas é baixa, nos aquíferos cársticos as respostas são quase imediatas.

As análises efetuadas com o auxílio de superfícies potenciométricas decenais ratificaram que o Aquífero Bambuí em Minas Gerais e na Bahia é muito sensível às secas recorrentes que afetam o semiárido. Essa sensibilidade deve-se à grande heterogeneidade do meio, a qual provê um rápido fluxo em direção aos exutórios naturais acarretando, na ausência de recargas, significativos rebaixamentos do freático. Entretanto, essa mesma heterogeneidade, da qual os sumidouros e dolinas densamente distribuídos constituem a feição mais visível, aumenta a resposta do freático em épocas de pluviometria generosa.

A contínua queda das precipitações decenais entre 1990 e o presente, das quais a Figura 6.7 constitui uma discreta amostra, pode, assim, explicar os problemas atualmente observados, dentre os quais se destacam o aprofundamento dos níveis nos poços da Bacia de Irecê, e as fracas vazões do rio Verde Grande.

De acordo com os resultados obtidos, não é muito ousado sugerir que os níveis das águas subterrâneas do carste São Francisco, e conseqüentemente suas reservas, são submetidos a uma flutuação de longo período. É possível constatar que os aquíferos cársticos vêm sofrendo os efeitos de uma longa série de pluviometrias decrescentes, agravados pela intensificação da exploração. As expectativas são de que, uma vez iniciado um novo ciclo de períodos chuvosos generosos, os níveis dinâmicos dos aquíferos cársticos do Grupo Bambuí apresentem uma significativa recuperação.

7 Hidroquímica regional

7.1 Amostragem e Análises

A hidroquímica regional foi elaborada a partir de amostras coletadas em duas campanhas distintas, perfazendo um total de 203 poços na primeira campanha, e 206 na segunda, distribuídos ao longo da área de estudo, conforme apresentado na Figura 7.1.

Entretanto, devido às condições peculiares da região trabalhada optou-se tratar os dados hidrogeoquímicos por três subáreas regionais, denominadas: subárea regional 1 - Irecê; subárea regional 2 – São Desidério; subárea regional 3 – Montes Claros. O quadro abaixo mostra o quantitativo de amostragem nas subáreas regionais e nas 3 áreas piloto. Nas áreas pilotos foram selecionados

um quantitativo maior de pontos amostrais, visando um maior detalhamento da hidroquímica no setor

Área	Número de amostras		
	Piloto	Regional	Total
Irecê	13	29	42
Montes Claros	14	83	97
São Desidério	14	50	64
Total de amostras			203

Essa divisão está embasada em aspectos litológicos, estruturais e climáticos que podem se apresentar de forma diferenciada nas áreas estudadas. São Desidério, por exemplo, se distingue das demais por apresentar o Grupo Urucua capeando o aquífero Bambuí na maior parte da área estudada. Na subárea regional de Montes Claros, nas rochas que compõem o aquífero Bambuí se destaca o forte componente estrutural que implica num maior índice de carstificação. E por fim, a subárea regional de Irecê apresenta o clima mais seco das três áreas estudadas. Esses componentes provavelmente refletem num comportamento hidrogeoquímico diferenciado em cada subárea.

A primeira campanha ocorreu entre os dias 19 de agosto de 2014 e 30 de setembro de 2014, representativos do período seco (estiagem) e a segunda campanha de amostragem de águas foi realizada no período de 17 de março a 24 de abril de 2015, representando a época úmida (chuvosa) da região.

A primeira campanha constou da coleta de amostras de água para as seguintes determinações hidroquímicas em laboratório: sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, dureza, cor aparente, turbidez, pH, potencial de oxirredução, amônia, nitrito, nitrato, ferro, manganês, cálcio, magnésio, potássio, sódio, alcalinidade total, bicarbonato, carbonato, cloreto, fluoreto, sulfato.

Na segunda campanha os poços coletados foram preferencialmente os mesmos, porém, alguns poucos precisaram ser substituídos, para tais substituições foram selecionados poços no entorno do original e seguindo os mesmos critérios de seleção da primeira campanha (poços com perfil e preferencialmente de abastecimento). Nessa segunda campanha além dos parâmetros físico-químicos acima elencados determinados na primeira campanha, foram realizados, também, as seguintes análises:

- **BTEX, Fenóis, metais:** BTEX (benzeno, etilbenzeno, tolueno, m,p-xilenos, o-Xileno, xilenos), índice de fenóis e metais (arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco).
- **Agroquímicos** (42 compostos): abamectina, acefato, acetamiprido, azoxistrobina, boscalide, captana, carbenzadim + benomil, carbosulfano, cialotrina lmbda, ciflutrina (soma), cimoxanil, cipermetrina (soma), ciproconazol, ciromazina, clorantraniliprole, clorfenapir, clorotalonil, clorpirifós + clorpirifós-oxon, deltametrina, dibromofluorometano, difenoconalzo, dimetoato, diurom, famaxadona, fenitrotiom, fenpropatrim, flumioxazim, glifosato + ampa, imidaclopride, iprodiona, linurom, metalaxil,

p-bromofluorbenzeno, picoxistrobina, piraclostrobina, procimidona, tebuconazol, tetraconazol, tiabendazole, tiamentoxam, tiofanato metílico, triazofós, trifloxistrobina.

Isótopos: Oxigênio-18 (^{18}O), Deutério (^2H), Trítio (^3H) e Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

A caracterização completa dos estudos de hidroquímica realizadas no âmbito do presente trabalho estão apresentadas no Relatório Técnico Temático de Hidroquímica, como parte integrante do Relatório Final.

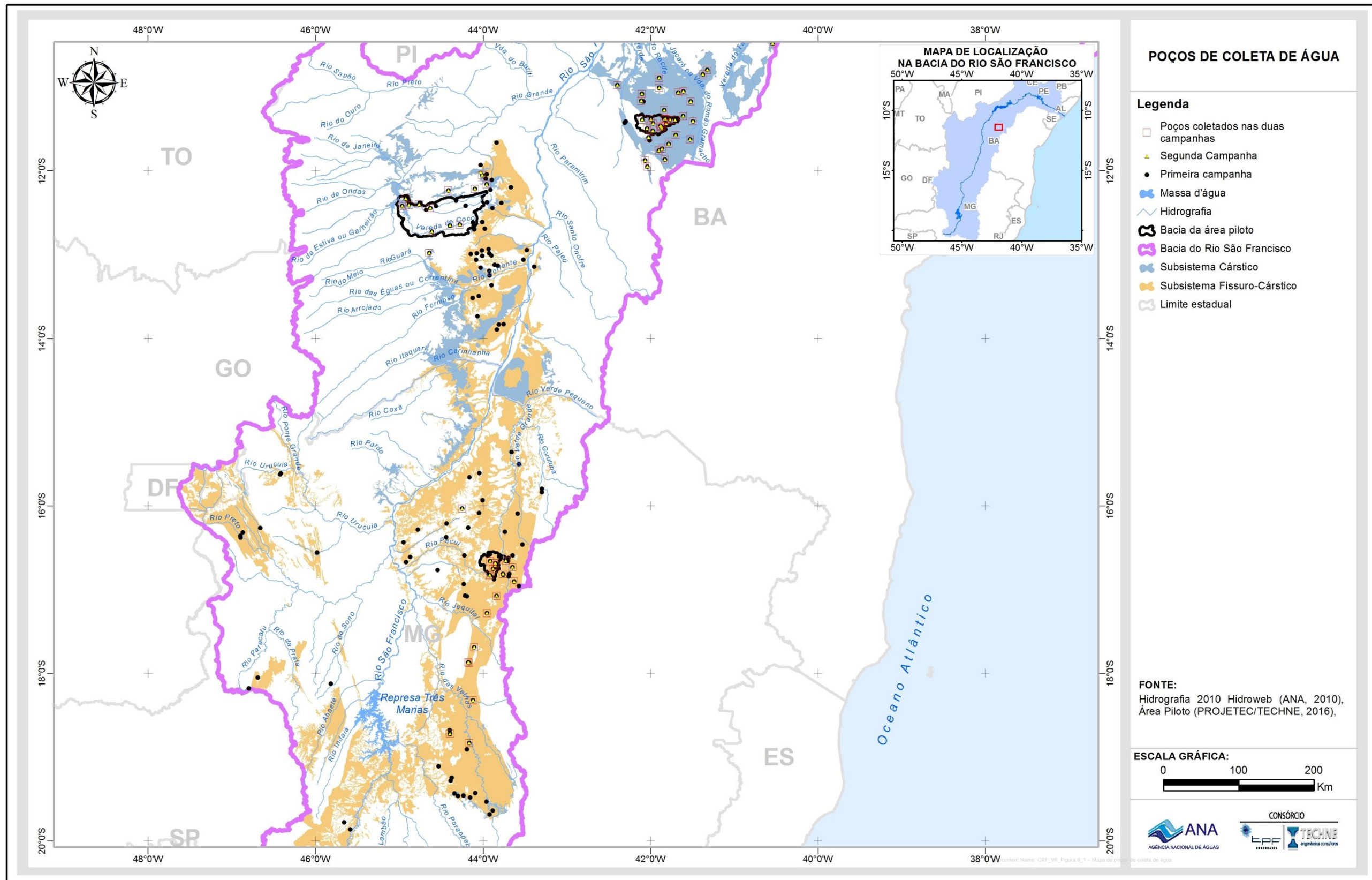


Figura 7.1: Mapa de poços de coleta de água

A seleção de pontos para amostragem de BTEX, fenóis, metais e agroquímicos teve como base, principalmente, os resultados da primeira campanha, análise do cadastro de fontes de contaminação e análise do mapa de uso do solo. Para os agroquímicos, além desses critérios de seleção, foi realizado um cadastramento das principais culturas agrícolas existentes nas três áreas, e posterior levantamento em campo e em instituições dos principais agroquímicos empregados.

Em todos os pontos de coleta foram determinados em campo, com auxílio de sondas multiparamétricas, os seguintes parâmetros: pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e potencial de oxirredução.

As amostras de águas foram analisadas na Bioagri Ambiental, parte delas na filial Bahia e outra parte na filial Belo Horizonte. A (Tabela 7.1) detalha para cada parâmetro avaliado o método analítico utilizado e respectivos limites de quantificação (LQ).

Tabela 7.1 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise.

Método	Parâmetros	LQ	Unidade	Metodologia
Titulação potenciométrica	Alcalinidade Total	0	mg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2310 B
	Bicarbonato (como CaCO ₃)	0	mg/L	
	Carbonato (como CaCO ₃)	0	mg/L	
Cromatografia de íons	Nitrato (como N)	0,1	µg/L	POP PA 124 - Rev.08
	Nitrito (como N)	0,02	µg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 NO ₂ - B
	Cloreto	1	µg/L	EPA 300.0: 1993, 300.1: 1999, POP PA 032 - Rev. 08
	Fluoreto	0,1	µg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 F C
	Sulfato	1	µg/L	EPA 300.0: 1993, 300.1: 1999, POP PA 032 - Rev. 08
Leitura em condutivímetro	Condutividade	0,1	µS/cm	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2510 B
Espectrofotometria	Cor Aparente	5	Pt/Co	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2120 B
Titulação potenciométrica	Dureza Total	5	mg/L	Calculado pelo cálcio e magnésio
ICP-MS	Ferro	1	µg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012, Método 3125 B / Preparo: EPA 3010 A: 1992 e EPA 3005: 1992
	Magnésio	50	µg/L	
	Manganês	1	µg/L	
	Potássio	50	µg/L	
	Sódio	50	µg/L	
Espectrofotometria	Amônia (como NH ₃)	0,1	mg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 NO ₃ - F
Potenciometria	pH (a 25°C)	2 a 12		SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2310 B
Potenciometria	Potencial Redox	-1000 a 1000	mV	
Gravimetria	Sólidos Dissolvidos Totais	5	µg/L	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2540 A, B, C, D, E
Turbidímetro	Turbidez	0,1	NTU	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2130 B

7.1.1 Qualidade analítica dos dados

A avaliação do erro nas análises foi estimada através do balanço de íons, em que a concentração total dos cátions deve ser semelhante à dos ânions, ambos expressos em meq/L. Sendo o valor da desigualdade, expresso em porcentagem, definido como o erro analítico (ou erro da análise).

As Figura 7.2 e Figura 7.3 ilustram os resultados obtidos na análise do balanço iônico, para as duas campanhas. Observa-se que para a primeira campanha, do universo de 203 amostras coletadas, 192 amostras (95% do total) apresentaram balanço iônico com erro até 10%, portanto, consistentes. Com

erro entre 10% e 20% ficaram 9 amostras (4% do conjunto analisado) e apenas 2 amostras (1%) mostraram erro acima de 20%.

É provável que as amostras com erro superior a 20% estejam relacionadas a uma baixa concentração iônica, que induz ao aumento do erro. Os métodos analíticos padrões são menos precisos para baixas concentrações iônicas, e nesse caso, os resultados podem apresentar concentrações próximas aos limites de detecção dos métodos de análises utilizados. Portanto, essas amostras não serão descartadas.

As amostras na faixa de erro entre 10% e 20%, num total de 9, serão aceitas, porém tratadas com restrições., conforme será especificado posteriormente. As 9 amostras nessa faixa foram avaliadas no intuito de verificar se o erro de análise está concentrado na determinação dos cátions e/ou dos ânions, e os resultados obtidos podem ser visualizados na (Tabela 7.2). De acordo com APHA (2005) o resultado da aplicação da fórmula apresentada na referida tabela deve estar entre 0,9 e 1,1. Para a maioria das amostras (seis) se evidencia que o erro analítico ocorreu na determinação dos cátions e em três casos ocorreu para os ânions (todos marcados em vermelho na tabela). Esse diagnóstico será utilizado no momento de tratar as amostras com restrições, conforme afirmado anteriormente, evitando assim descartar completamente um laudo analítico que pode parcialmente apresentar resultados fidedignos.

Tabela 7.2 – Avaliação das amostras com erros entre 10 e 20% mediante aplicação da Equação 4.3.

	C-034	C-036	C-037	C-038	C-039	C-105	C-110	C-143	C-145
$100 * \frac{\Sigma(+)}{CE} =$	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1,0	0,9	1,3	0,9
$100 * \frac{\Sigma(-)}{CE} =$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	1,0	0,9

Para a segunda campanha predominam resultados precisos e aceitáveis, ou seja, com erros analíticos no máximo iguais a 5%. Apenas uma amostra apresenta erro de análise acima de 10%, portanto, impreciso, e a amostra será descartada.

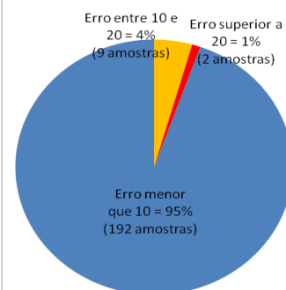
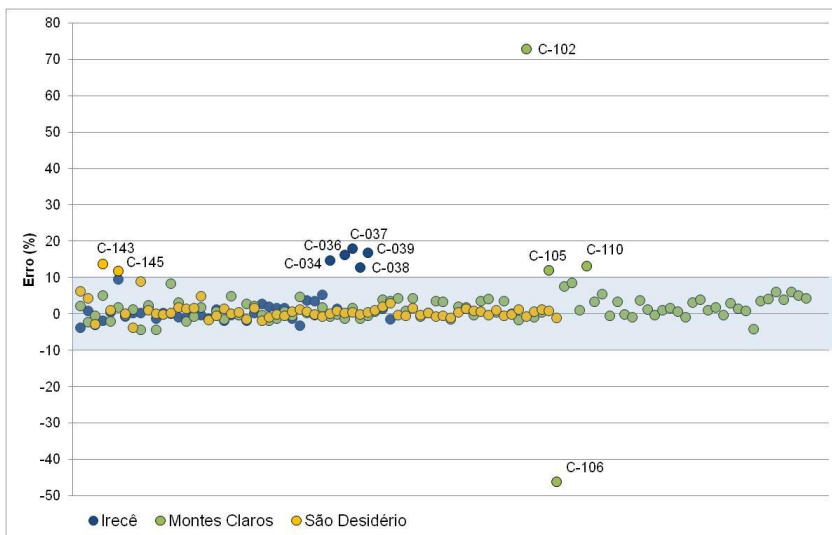


Figura 7.2: Balanço iônico primeira campanha

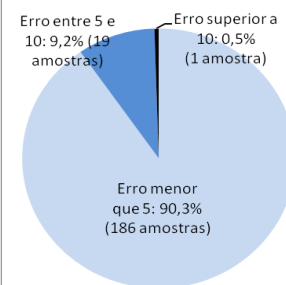
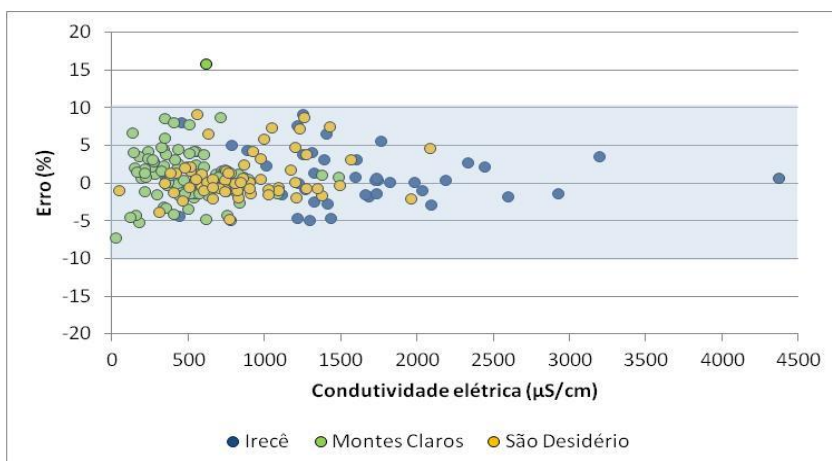


Figura 7.3: Balanço iônico segunda campanha

7.2 Hidrogeoquímica da Subárea Regional 1 - Irecê

A Subárea regional 1 é mostrada na Figura 7.4. Localiza-se no estado da Bahia, no extremo norte da área de estudo. Suas características principais são as cotas elevadas e a ocorrência exclusivamente de sedimentos carbonatados da Formação Salitre do Grupo Una. Trata-se, em outras palavras, da Bacia de Irecê.

Da análise dos perfis litológicos e construtivos dos poços amostrados nessa subárea, observa-se que todos apresentam características hidrogeológicas semelhantes dentro de um contexto cárstico carbonático.

A caracterização hidrogeoquímica desse aquífero, o qual é representado pelo aquífero Salitre, é função da composição litológica, dos fatores climáticos (principalmente a pluviometria), dos aspectos estruturais e dos processos de dissolução/carstificação. Esses últimos processos citados, na área, são bem desenvolvidos, a julgar pela densidade de dolinas, sumidouros e condutos existentes.

É importante destacar que a infiltração das águas pluviométricas, associada à forma e à circulação da água dentro do aquífero, exerce, provavelmente, grande influência no quimismo dessa água. Todos esses aspectos serão discutidos para ajudar na compreensão dos principais processos que controlam a qualidade das águas do aquífero Salitre na área de estudo.

A Figura 7.4 apresenta a localização das amostras dentro do contexto geológico.

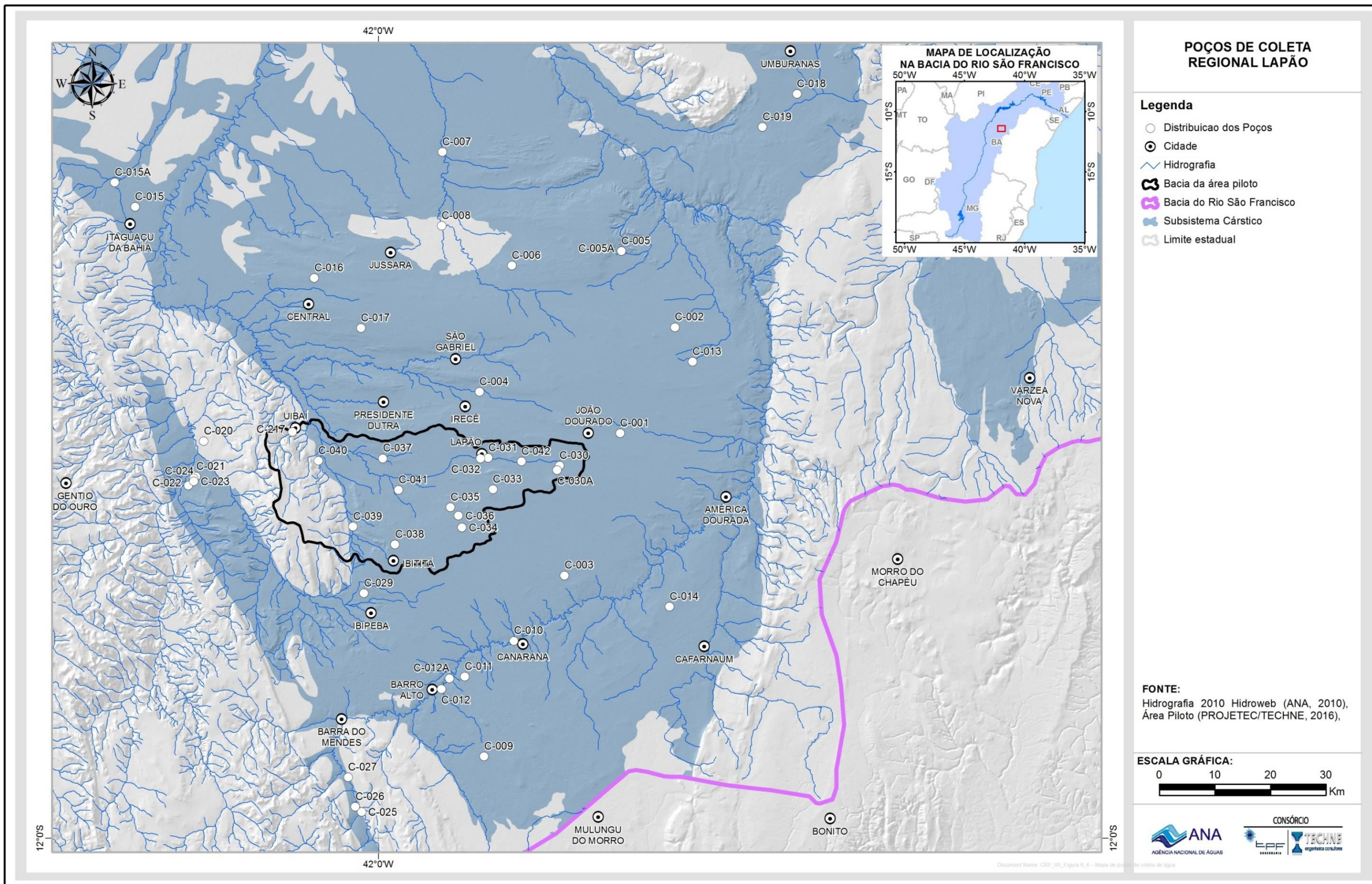


Figura 7.4: Distribuição dos poços na área regional de Irecê.

7.2.1 Caracterização das Águas

Para um melhor entendimento desses fatores e da interpretação dos dados químicos analíticos das águas subterrâneas desenvolveu-se um tratamento estatístico descritivo, com auxílio de gráficos de distribuição e de correlação. Os sumários estatísticos das amostras de água, coletadas nos dois períodos amostrais (seco e úmido), constam na Tabela 7.3 e na Tabela 7.4.

Tabela 7.3 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período seco (n=42).

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,57	7,50	7,09	7,08	0,22	3,12	0,93
T (°C)	25,00	29,60	25,85	25,40	1,13	4,37	4,60
CE (µS/cm)	550,00	5140,00	1797,19	1710,00	827,31	46,03	4590,00
ORP (mV)	- 114,60	682,00	121,70	115,75	119,72	98,37	796,60
STD (mg/L)	455,00	4317,00	1526,12	1316,00	799,11	52,36	3862,00
Dureza (mg/L CaCO ₃)	199,00	1740,00	746,19	646,00	361,44	48,44	1541,00
Cálcio (mg/L)	55,10	476,00	200,15	182,50	102,84	51,38	420,90
Magnésio (mg/L)	14,30	241,00	59,75	54,80	37,97	63,56	226,70
Sódio (mg/L)	7,07	526,00	85,09	71,45	85,42	100,39	518,93
Potássio (mg/L)	1,24	10,80	4,15	3,46	2,48	59,82	9,56
Bicarbonato (mg/L CaCO ₃)	246,00	516,00	323,40	315,50	54,62	16,89	270,00
Sulfato (mg/L)	1,06	1140,00	153,39	97,70	184,63	120,37	1138,94
Cloreto (mg/L)	2,38	1410,00	281,61	208,50	259,24	92,05	1407,62
Fluoreto (mg/L)	0,03	2,73	0,56	0,28	0,57	102,14	2,71
Fosfato (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Nitrato (mg/L N)	0,15	75,10	18,40	17,15	16,16	87,83	74,95
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,36	0,03	0,01	0,08	249,78	0,35
Amônia (mg/L NH ₃)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Ferro (mg/L)	0,003	1,97	0,26	0,06	0,51	197,61	1,97
Manganês (mg/L)	0,001	0,25	0,03	0,003	0,06	216,55	0,25

*Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

Tabela 7.4 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período úmido (n=42).

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,60	7,53	7,04	7,00	0,23	3,27	0,93
T (°C)	25,00	27,20	25,23	25,00	0,58	2,32	2,20
CE (µS/cm)	350,00	4370,00	1604,52	1420,00	746,87	46,55	4020,00
ORP (mV)	-160,70	482,00	119,60	129,90	107,25	89,68	642,70
STD (mg/L)	282,00	4564,00	1439,62	1242,50	861,69	59,86	4282,00
Dureza (mg/L CaCO ₃)	242,00	1910,00	704,12	634,00	361,78	51,38	1668,00
Cálcio (mg/L)	72,20	483,00	185,87	156,50	96,89	52,13	410,80
Magnésio (mg/L)	12,80	244,00	58,22	55,60	39,50	67,86	231,20
Sódio (mg/L)	8,20	822,00	87,87	68,40	125,17	142,45	813,80
Potássio (mg/L)	0,97	12,90	4,33	3,75	2,82	65,17	11,93
Bicarbonato (mg/L CaCO ₃)	124,00	519,00	329,83	327,00	68,47	20,76	395,00
Sulfato (mg/L)	1,24	1260,00	154,02	94,75	208,04	135,07	1258,76
Cloreto (mg/L)	11,60	1920,00	286,33	194,50	326,00	113,85	1908,40
Fluoreto (mg/L)	0,13	2,78	0,80	0,50	0,76	95,57	2,66
Fosfato (mg/L)	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	101,76	0,06
Nitrato (mg/L N)	0,25	42,90	13,56	13,05	10,92	80,57	42,65
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,19	0,02	0,01	0,03	184,92	0,18
Amônia (mg/L NH ₃)	0,05	0,21	0,06	0,05	0,03	47,50	0,16
Ferro (mg/L)	0,001	2,32	0,28	0,08	0,53	192,74	2,32
Manganês (mg/L)	0,001	2,85	0,09	0,003	0,44	495,15	2,85

*Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

As amostras de águas dos poços inseridas no aquífero Salitre na região de Irecê apresentam, como característica principal, uma mineralização expressiva, típica de aquíferos cársticos. Todos os valores encontrados para STD, nos dois períodos de coleta, foram superiores a 250 mg/L. No período seco, variaram de 455,0 mg/L (C-015) a 4317,0 mg/L (C-028), com média de 1526,12 mg/L (Tabela 3) e, no período úmido os teores alteraram de 282 mg/L (C-025) a 4564,0 mg/L (C-028), com média de 1439,62 mg/L (Tabela 7.3).

No mapa de distribuição dos STD para o período seco (Figura 7.5), observa-se que os teores acima de 1000 mg/L predominam, ocorrendo de forma dispersa na área, sendo que o maior teor (C-028, com 4317,0 mg/L), encontra-se no município de Campo Formoso, no extremo nordeste da área, nas proximidades dos complexos cristalinos. Os teores entre 500 a 1000 mg/L estão em porções localizadas, nos municípios de Orolândia (C-018 e C-019) e Barra do Mendes (C-025 e C-026), respectivamente na porção sul e extremo nordeste da área, enquanto que os menores teores, abaixo de 500 mg/L, têm um registro (C-015), posicionado na parte noroeste, no município de Itaguaçu da Bahia, nas proximidades dos depósitos clásticos Cenozoicos. A distribuição dos STD para o período úmido segue a mesma tendência do período seco, não evidenciando, portanto, mudanças significativas entre os períodos (Figura 7.5 e Figura 7.6).

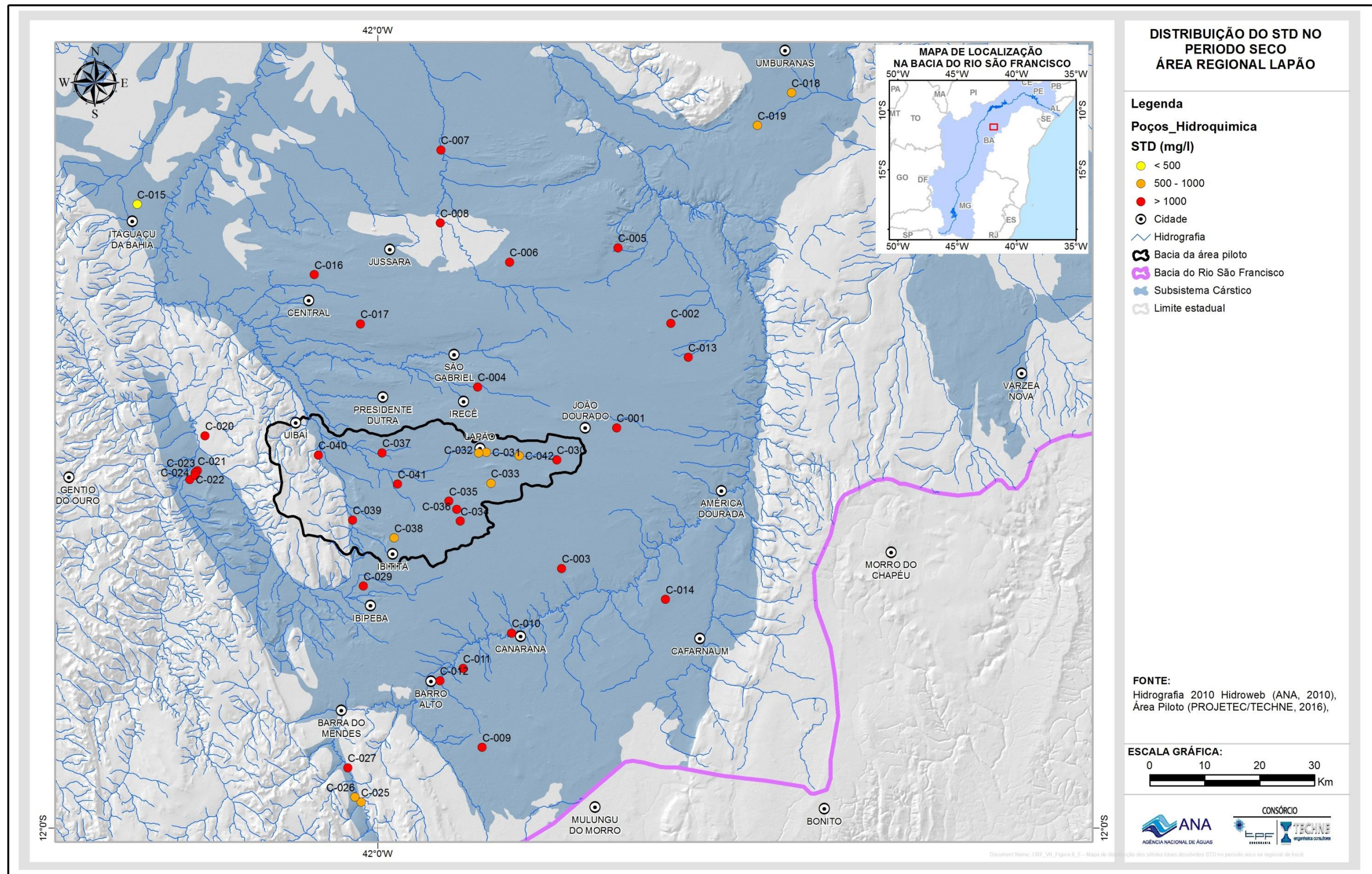


Figura 7.5: Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período seco na regional de Irecê.

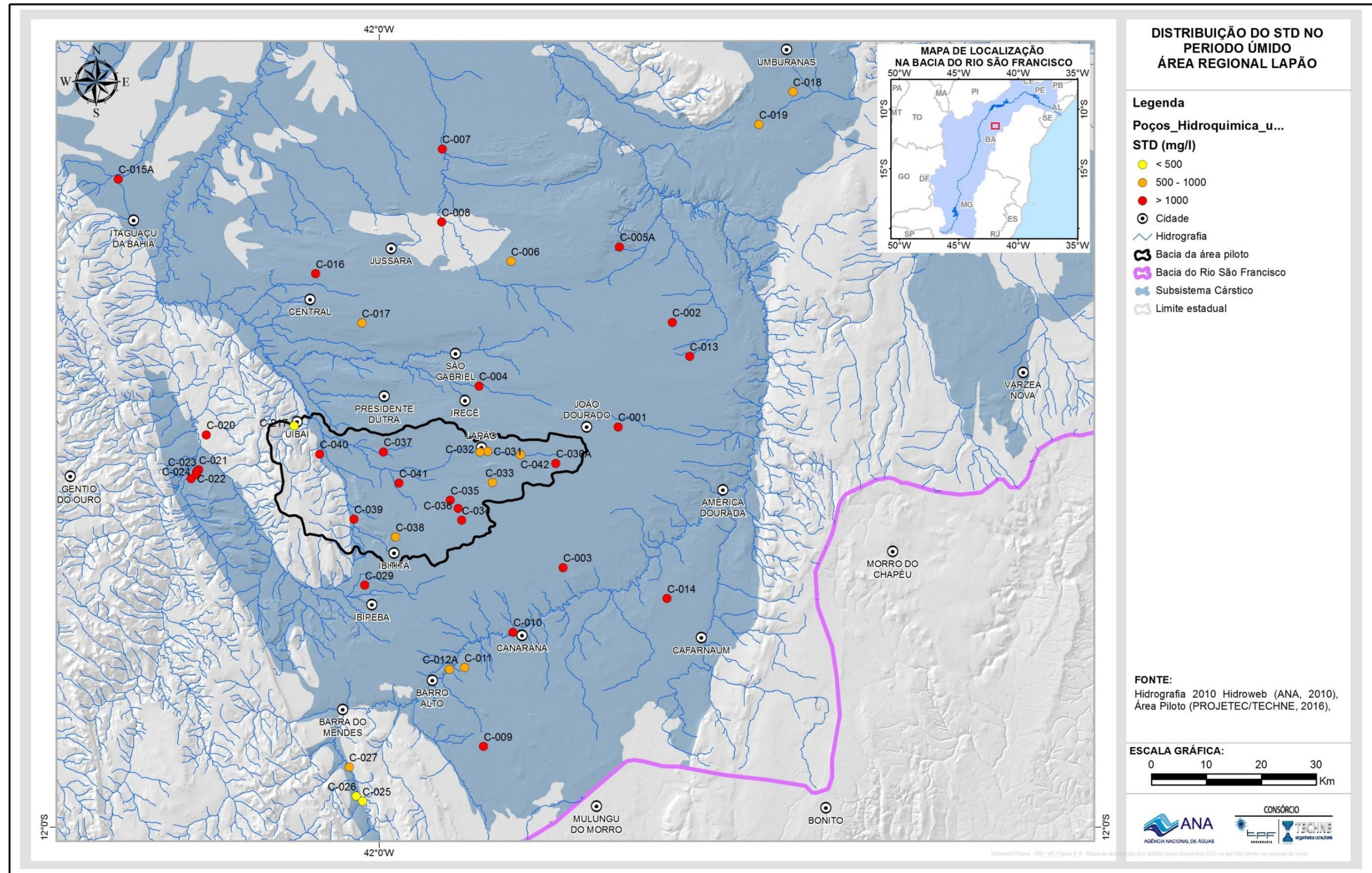


Figura 7.6: - Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período úmido na regional de Irecê.

O enriquecimento das águas subterrâneas da região de Irecê é controlado, principalmente, pelos parâmetros cloreto, cálcio e sódio. Os diagramas de dispersão ilustram claramente esse enriquecimento, mostrando correlações positivas e forte, comprovados pelos consistentes alinhamentos de pontos (Figura 7.7 a Figura 7.9). As correlações dos STD com cloreto e cálcio são positivamente significativas, para os dois períodos. Por outro lado, a correlação dos STD com o sódio é também positivamente representativa, mesmo que mais moderada. É importante destacar que além do controle químico e litológico, a salinização dessas águas estaria relacionada, também, com as condições de recarga e de circulação subterrânea, considerando que a área tem zonas preferenciais de carstificações e de lineamentos estruturais que, certamente, são responsáveis pela renovação e circulação de água.

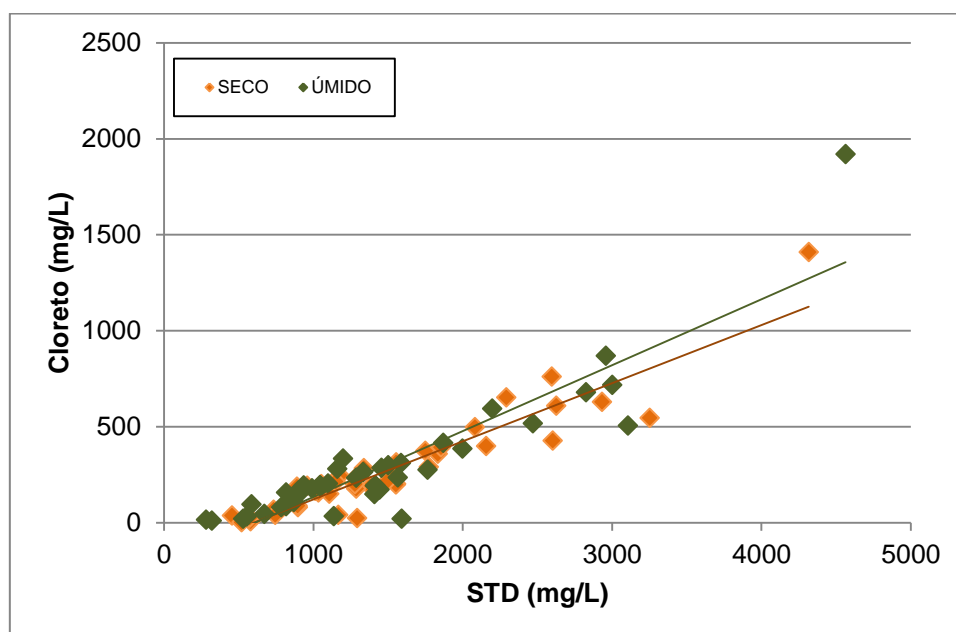


Figura 7.7: Correlação entre STD e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê

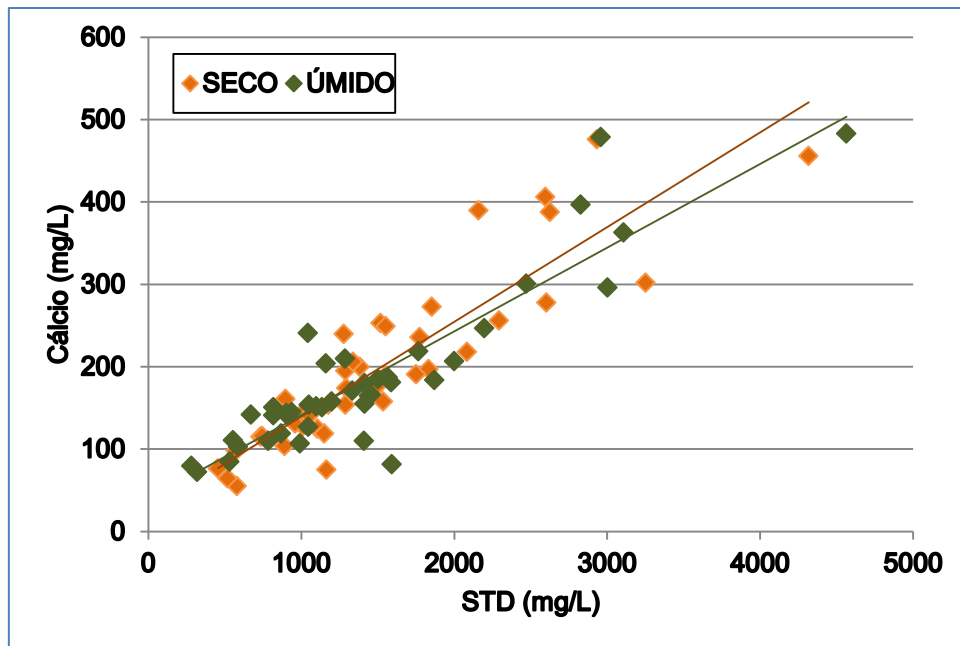


Figura 7.8: Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

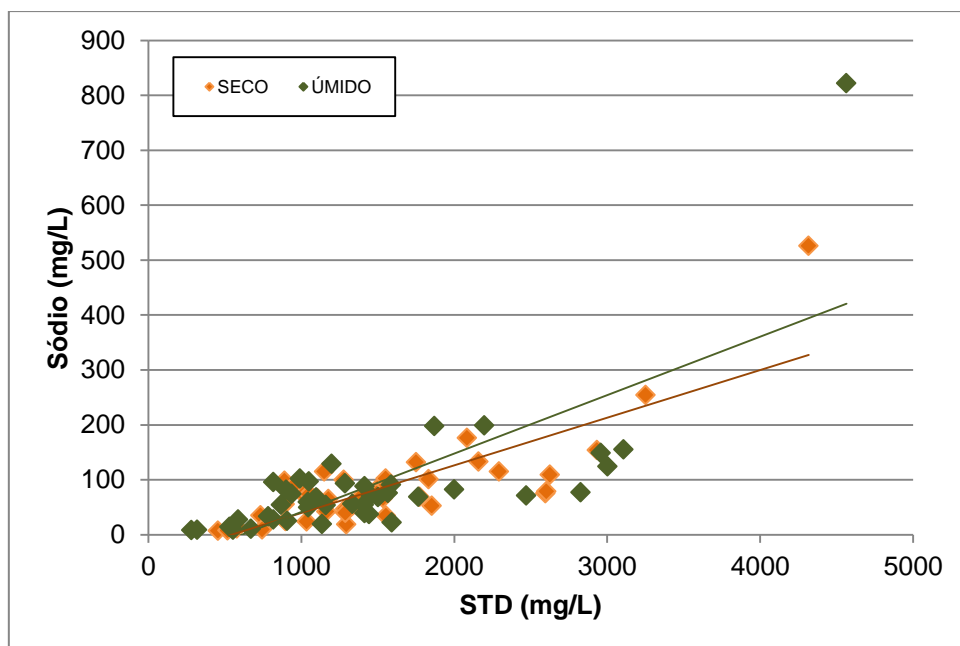


Figura 7.9: Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

Tomando por base a classificação das águas subterrâneas em função da concentração de STD, conforme McNeely et. al. (1979) (Figura 7.5), identificou-se que a grande maioria das amostras de águas, para os dois períodos sazonais, são ligeiramente salobras, sendo que apenas dois casos (C-010 e C-028) apresentam águas moderadamente salobras.

As águas doces ocorrem de maneira subordinada na área. Estão representadas no período seco pelas amostras C-015, C-018, C-019, C-025, C-026, C-031, C-032, C-033, C-034 e C-042 e no período úmido pelas amostras C-006, C-011, C-012 A, C-017, C-018, C-019, C-025, C-026, C-027, C-028, C-032, C-038 e C-042.

Tabela 7.5 - Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979)

Tipo	STD (mg/L)
Doces	< 1000
Ligeiramente Salobras	1000 – 3000
Moderadamente Salobras	3000 – 10000
Salgadas	10000 - 100000
Salmouras	> 100000

A Tabela 7.3 mostra a variação dos valores de pH medidos in situ nas amostras de água coletadas no período seco. Nota-se que as águas apresentam valores de pH oscilando entre 6,57 (C-039) a 7,5 (C-007), com média de 7,09. No período úmido (Tabela 7.4) os valores de pH mostram amplitude um pouco mais elevada, variando entre 6,60 (C-008, C-024) a 7,53 (C-038), com média de 7,04. No geral as amostras de águas variam de pouco ácidas a levemente neutra, havendo predominância de água com caráter levemente neutro nos dois períodos sazonais.

Os mapas de distribuição dos valores de pH das amostras de águas na região de Irecê, mostram uma certa predominância dos valores de pH acima de 7,0 no período seco (Figura 7.10). Enquanto que no período úmido (Figura 7.11), com a entrada do CO₂ proveniente da precipitação pluviométrica as águas tornam-se levemente ácidas a neutras (pH entre 6,6 a 7,0), principalmente nos setores onde se encontram concentrações expressivas de carstificações, que proporcionam um menor tempo de trânsito e rápida circulação das águas, bem como uma maior dissolução das rochas calcárias em contato com as águas subterrâneas do aquífero.

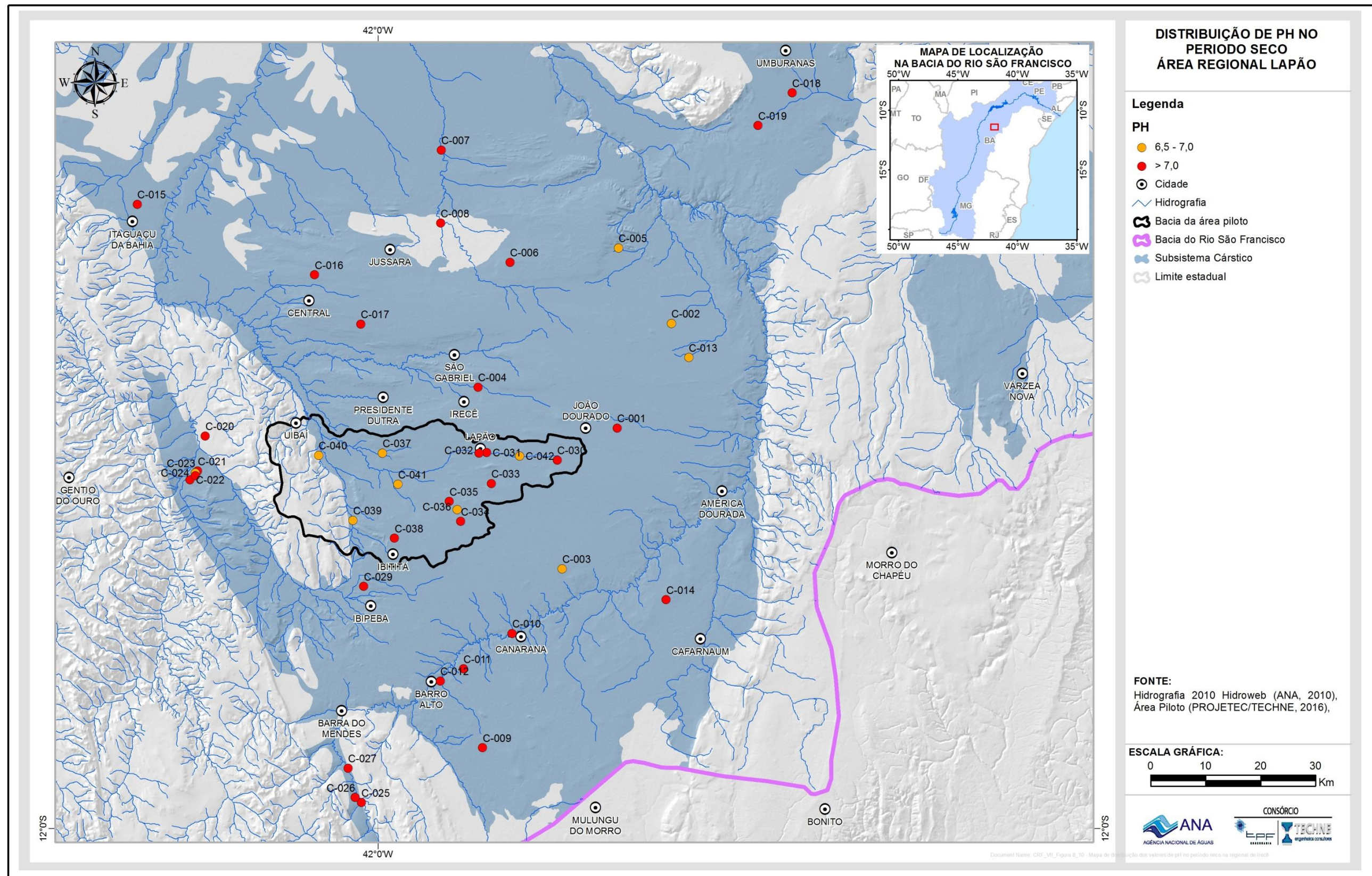


Figura 7.10: Mapa de distribuição dos valores de pH no período seco na regional de Irecê.

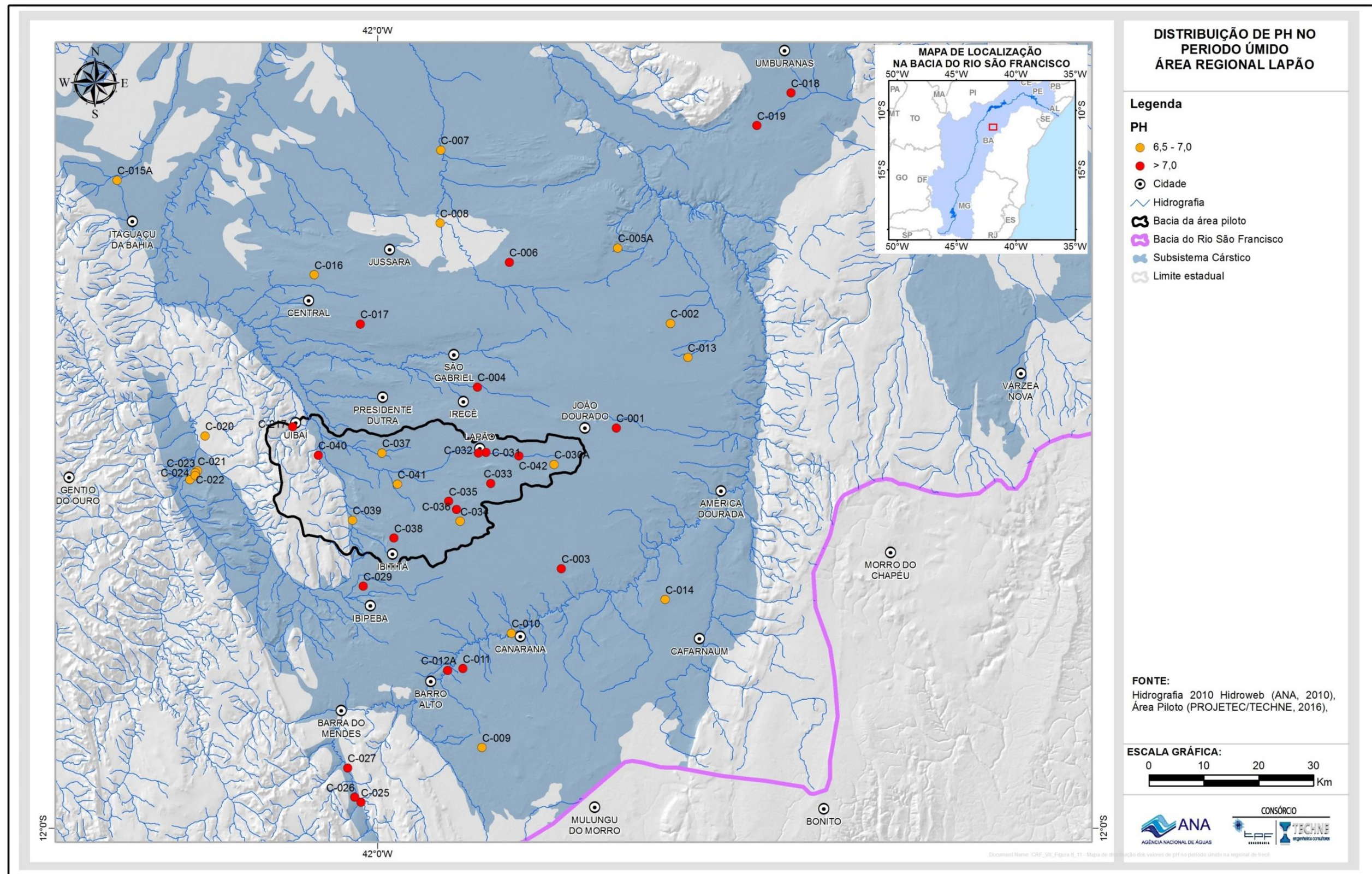


Figura 7.11: Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê.

Dentre os constituintes secundários presentes nas águas subterrâneas na região de Irecê, o nitrato apresenta maior destaque (Tabela 7.3 e Tabela 7.4).

As Figura 7.12 e Figura 7.13 mostram espacialização dos teores de nitrato nos períodos seco e úmido, respectivamente. Percebe-se que uma parcela significativa dos poços registra teores de nitrato acima de 10 mg/L N, estando concentrados nas porções norte, extremo nordeste, oeste e, também por grande parte da área piloto, não seguindo, portanto, uma dispersão preferencial.

As amostras de água com os menores teores de nitrato na região de Irecê (< 5 mg/LN) ocorrem em maiores proporções no período úmido, estando presente principalmente na parte sul da área de estudo. É importante destacar que apenas os poços C-003, C-006, C-006, C-009, C-010, C-011, C-020, C-027, C-037 e C-038 apresentam teores baixos de nitrato em ambos os períodos amostrados.

O enriquecimento de nitrato das águas subterrâneas da região de Irecê parece ter relação com contaminações de origem antrópica, originadas da falta de saneamento básico e da presença de fertilizantes utilizados em práticas agrícolas na área.

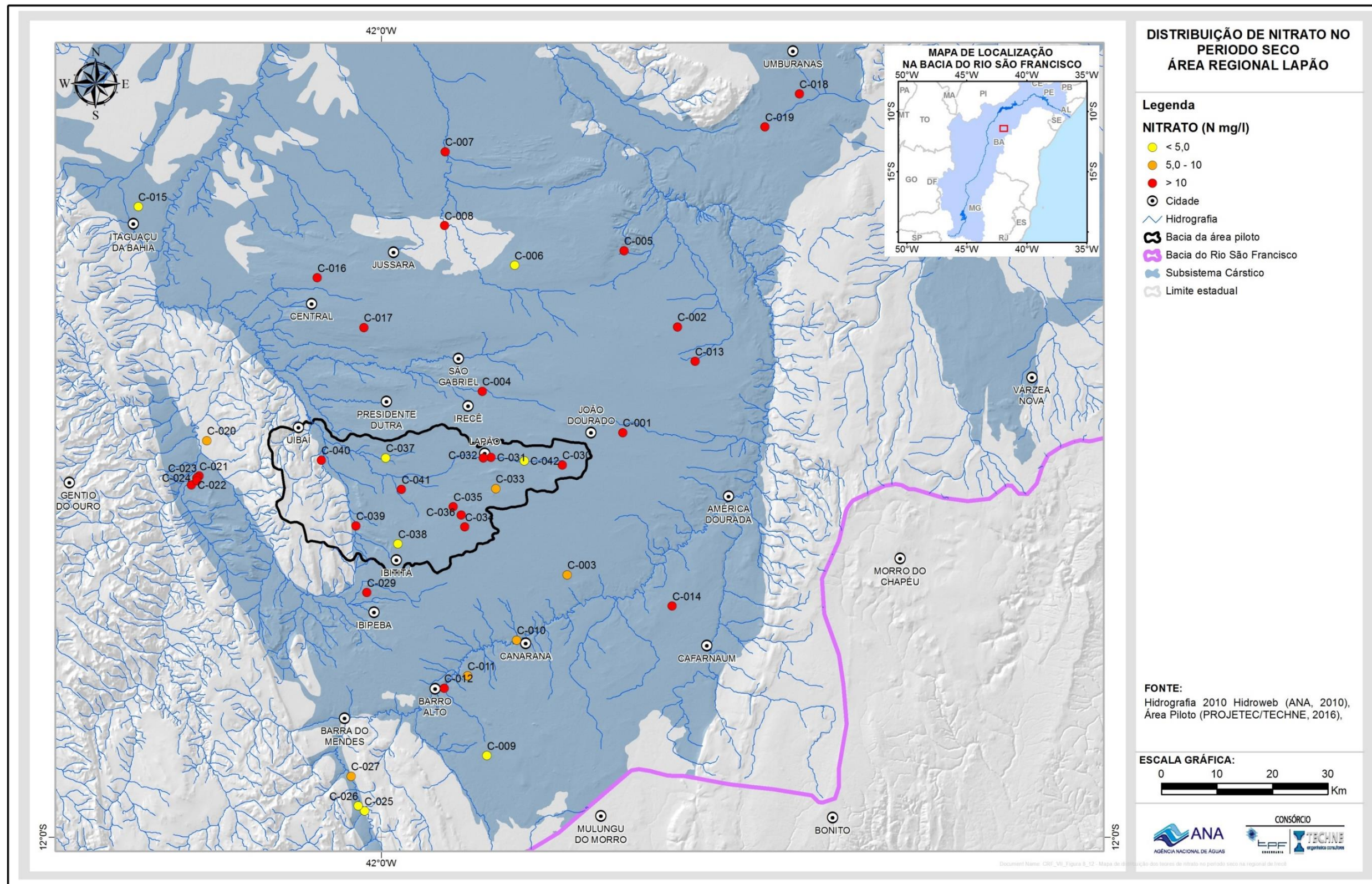


Figura 7.12: Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê.

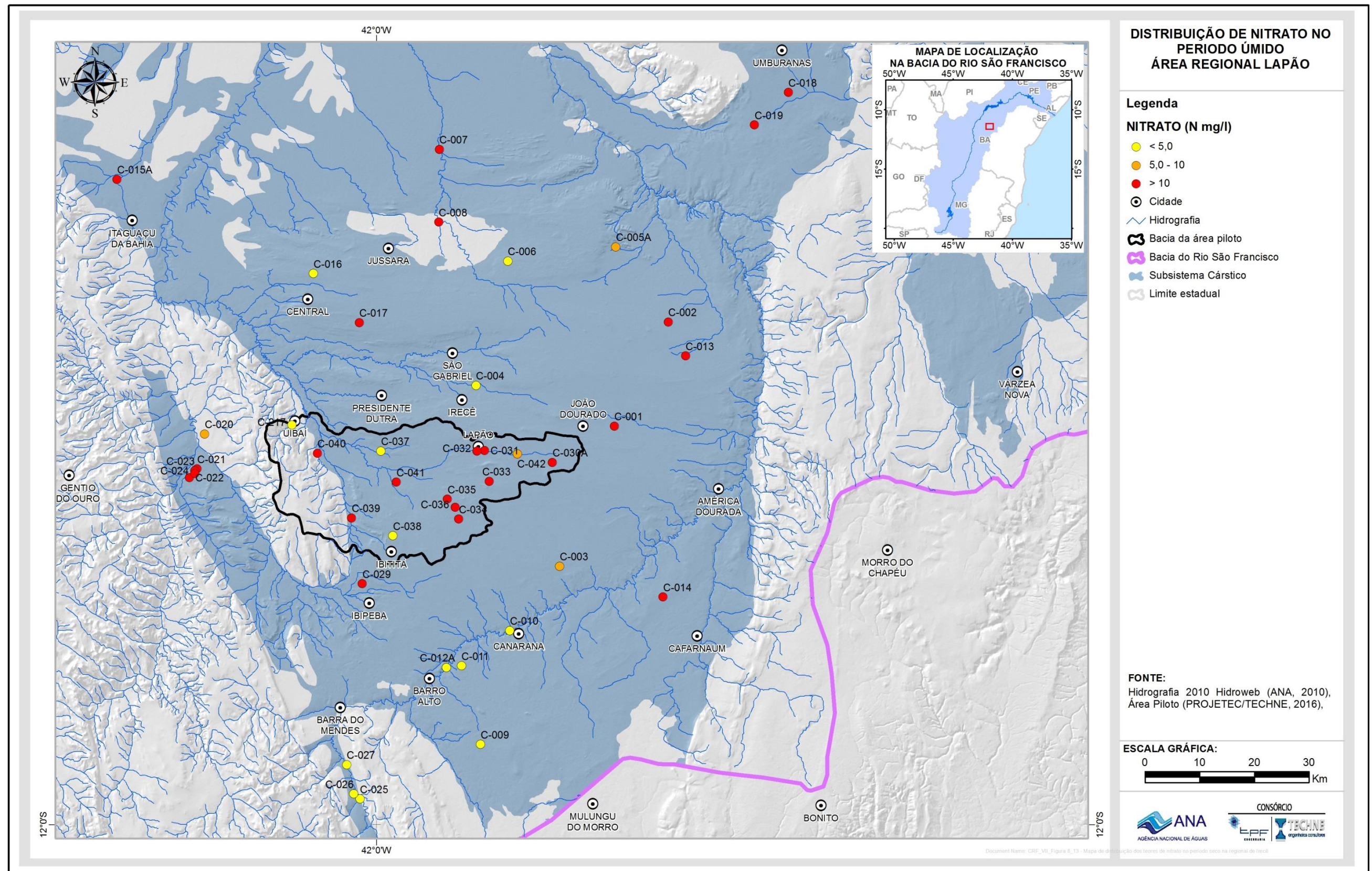


Figura 7.13: Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período úmido na regional de Irecê.

Os resultados da dureza para as águas subterrâneas, na região de Irecê, estão apresentados na Tabela 7.3 e Tabela 7.4, nos períodos seco e úmido, respectivamente. No período seco, os teores da dureza variaram de 199 (C-025) a 1740 mg/L (C-010) com média 746,19 mg/L. Para o período úmido, os valores da dureza variaram entre um mínimo de 242 (C-026) e um máximo de 1910 mg/L (C-010), com média de 704,12mg/L. Percebe-se, portanto, uma tendência de elevação dos teores da dureza no período seco.

A distribuição das concentrações da dureza por períodos de amostragem está ilustrada nas Figura 7.14 e Figura 7.15. Observa-se que os maiores teores da dureza (> 600 mg/L), dominantes na área, nos dois períodos sazonais, ocorrem de forma difusa, com tendência a se concentrarem, principalmente, nas porções sul e norte da área. Na área piloto, entretanto, águas com teores maiores do que 600 mg/L estão, predominantemente, posicionadas na porção oeste.

Os teores intermediários, entre 600 a 200 mg/L, ocorrem, principalmente, na parte leste da área piloto, nas proximidades de Lapão e Irecê, mas também nas porções norte, nordeste e sul da área, nos dois períodos de amostragem. Nota-se, portanto, que na porção leste da área piloto há certa diminuição dos teores da dureza, ocasionados, possivelmente, pela quantidade significativa de zonas preferenciais de carstificações existentes, que proporcionam certamente uma recarga expressiva e rápida circulação de água.

No período seco não foi registrado nenhum poço com teores da dureza menor de 200 mg/L. Já no período úmido apenas água do poço C-217 obteve teor dureza menor do que 200 mg/L, ressaltando que se trata de um poço completado no quartzito da Formação Morro do Chapéu, que normalmente tem valores da dureza inferiores às águas dos aquíferos cársticos.

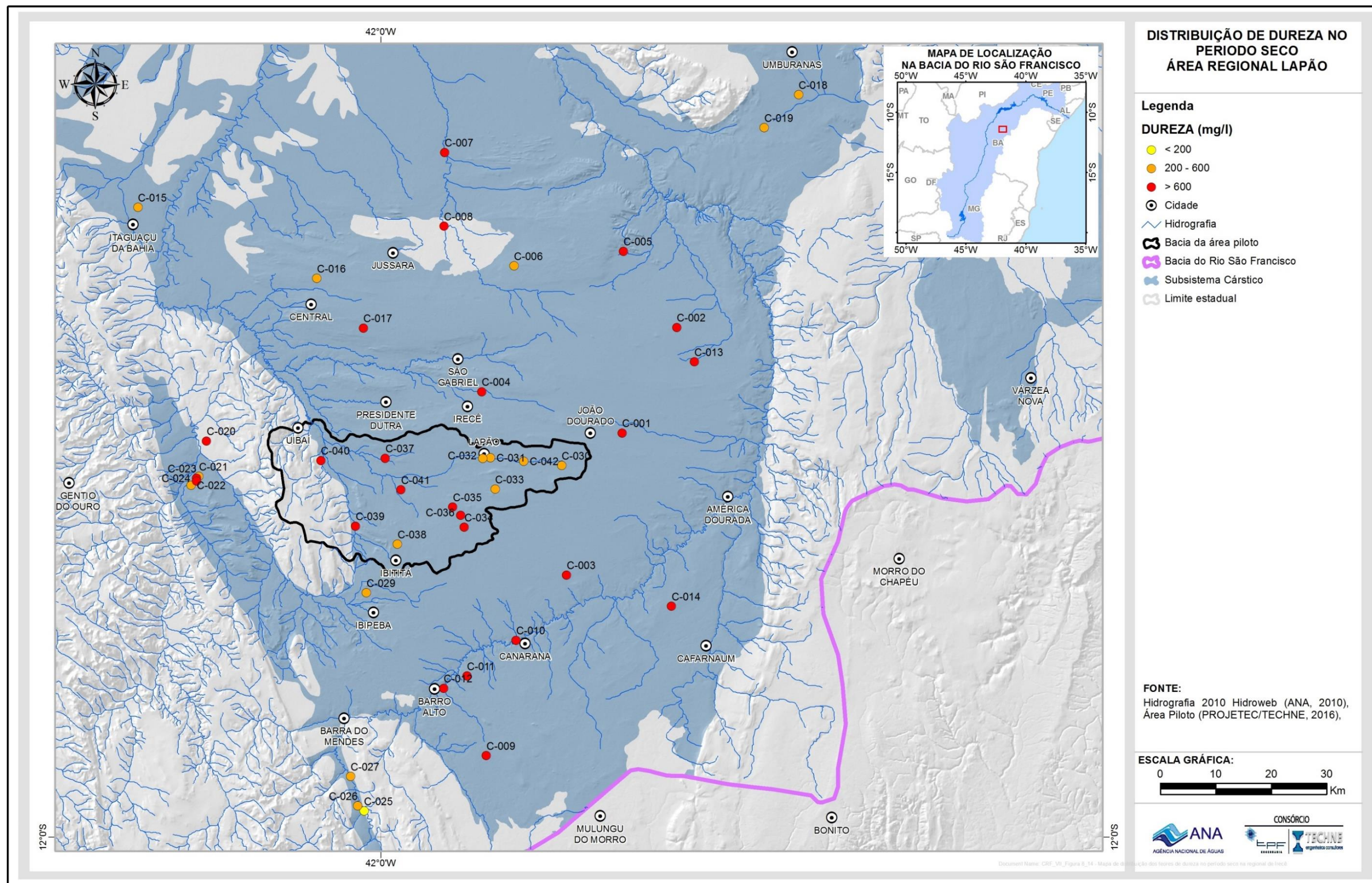


Figura 7.14: Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê.

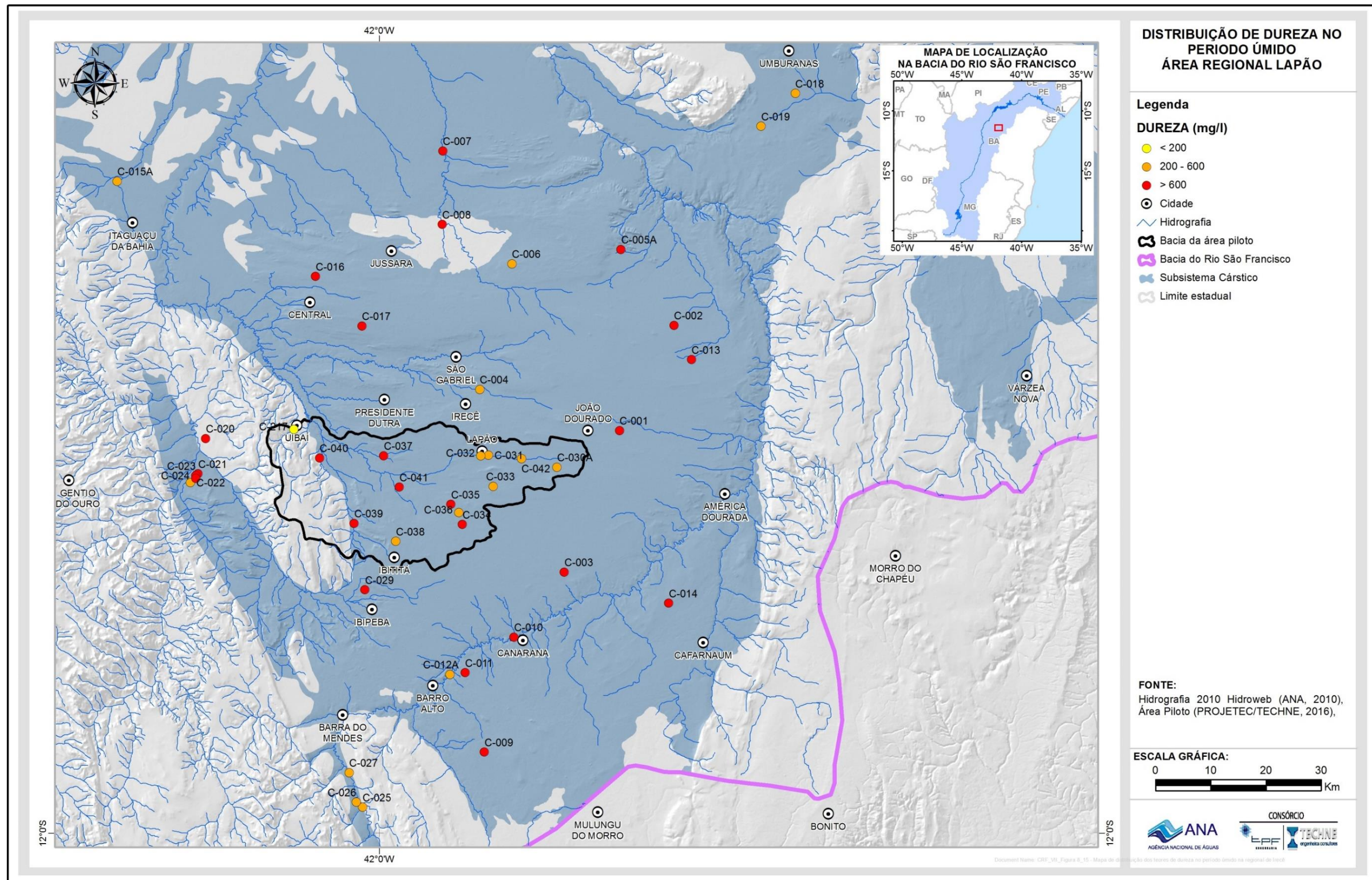


Figura 7.15: Mapa de distribuição dos teores de dureza no período úmido na regional de Irecê.

7.2.2 Fácies hidroquímicas

Na Figura 7.16 estão representados os diagramas de Piper (Piper, 1944) das amostras de água analisadas no âmbito do projeto, para os períodos seco e úmido. De maneira geral, observa-se um predomínio de fácies de águas cloretadas cálcicas, seguida das bicarbonatadas cálcicas a magnesianas, em ambos os períodos de amostragem.

As águas bicarbonatadas cálcicas a bicarbonatadas magnesianas representam a dissolução das rochas carbonáticas que compõem o meio aquífero estudado, e espacialmente ocorrem em dois domínios preferenciais da área:

- Porção leste da bacia do riacho do Juá (área piloto): que corresponde a zona preferencial de recarga das águas subterrâneas da bacia, notadamente por apresentar os setores de maior carstificação (dolinas) e conseqüentemente de maior circulação/renovação das águas. Esses aspectos são melhor discutidos no volume correspondente a hidroquímica das áreas piloto.
- Porção sudoeste da área regional, nas proximidades de Barra do Mendes: nesse setor a Formação Salitre apresenta-se bastante carstificada, promovendo então, uma circulação rápida e eficiente das águas subterrâneas. Ainda, a proximidade com os afloramentos de rochas e sedimentos siliciclásticos correlacionados à Formação Morro do Chapéu e aos Depósitos Cenozoicos, respectivamente, promove um maior aporte e diluição dessas águas.

As águas com fácies predominantemente cloretadas cálcicas distribuem-se aleatoriamente nos demais domínios da área e correspondem às amostras com salinidade superior a 1000 mg/L de STD (Figura 7.5 e Figura 7.6). O aporte cloretado dessas águas provavelmente está relacionado a uma circulação deficiente da água subterrânea nesses setores (menos carstificados), aliado a fatores climáticos, já que as rochas encontradas na área não apresentam minerais compostos por cloretos. A origem do cloreto nessas águas subterrâneas está nas precipitações pluviométricas, e cujo ambiente semiárido propicia uma elevada taxa de evaporação, resultando numa concentração contínua desse elemento nas águas subterrâneas.

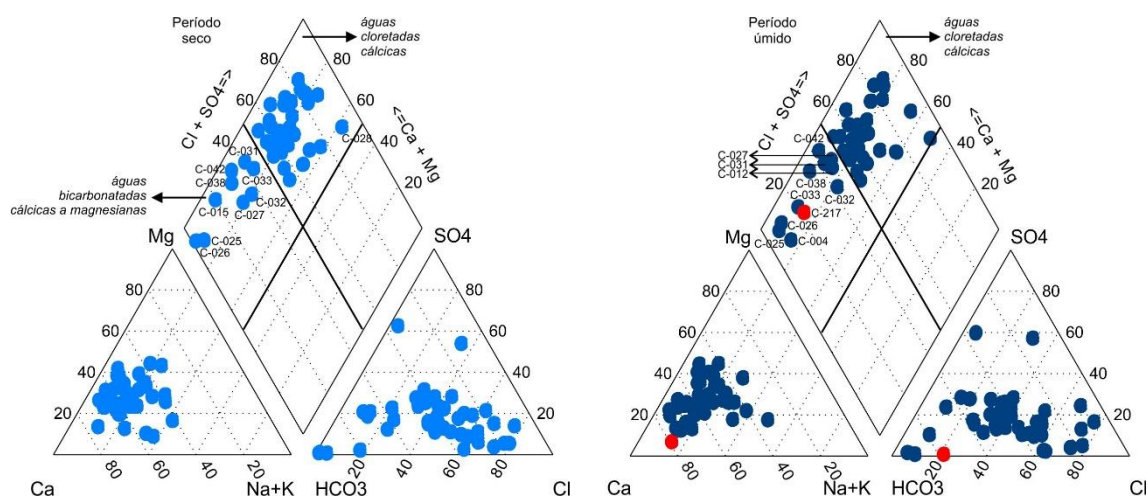


Figura 7.16: Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Irecê. A amostra vermelha corresponde a coleta na Formação Morro do Chapéu.

7.2.3 Parâmetros Específicos

7.2.3.1 Metais Pesados

Foram analisados os metais pesados arsênio, boro, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco, em pontos previamente selecionados no entorno de fontes potenciais de contaminação. Essa seleção foi realizada mediante a análise do mapa de uso de solo e cadastro de fontes de contaminação. Os resultados analíticos são apresentados na Tabela 7.6.

Todas as determinações para cádmio, cromo e mercúrio foram abaixo do limite de quantificação do método de análise. Para os demais parâmetros (arsênio, boro, bário, chumbo, cobre, níquel e zinco) os resultados detectados foram da ordem de traço ou abaixo do LQ, cuja presença deve estar ligada a fatores naturais, portanto, em todos os casos, abaixo do VMP da Portaria MS nº 2914 (2011).

Tabela 7.6 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Irecê

	Arsênio o	Boro	Bário	Cádmio o	Chumb o	Cobre	Cromo	Mercúrio	Níquel	Zinco
VMP ¹	0,01	-	0,7	0,005	0,01	2	0,05	0,001	0,07	5
C-007	0,005	0,236	0,072	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,004
C-019	< 0,001	0,313	0,055	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,022
C-022	< 0,001	< 0,001	0,222	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	< 0,001
C-027	< 0,001	0,147	0,072	< 0,001	0,004	0,007	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,552
C-038	< 0,001	0,025	0,080	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,007
C-040	< 0,001	0,085	0,035	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,080
C-042	0,005	0,046	0,078	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	0,003	0,010

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria nº 2914/202.

7.2.3.2 Agroquímicos

Os pontos destinados às análises de agroquímicos estão localizados em áreas agrícolas potencialmente sob a influência do uso de fertilizantes e pesticidas. Foram avaliados 42 agroquímicos, elencados no item 7.1. do presente relatório. A seleção dos compostos analisados foi realizada mediante o cadastramento das principais culturas agrícolas existentes na área e o posterior levantamento em campo e em instituições, dos princípios agroquímicos empregados. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de detecção. A não detecção desses compostos pode denotar a sua inexistência ou a presença em quantidades muito reduzidas.

7.2.3.3 Derivados de Petróleo

Na avaliação desses compostos foram selecionados poços para a investigação de eventuais ocorrências de contaminantes em áreas no entorno de postos de combustíveis e oficinas mecânicas.

Foram avaliados os parâmetros benzeno, etilbenzeno, tolueno, m,p-xilenos, o-xileno, xilenos e índice de fenóis. Para avaliação desses compostos foram analisadas sete amostras (Figura 7.7) cuja localização encontra-se na Figura 7.1. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 7.7 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.

Parâmetro	Benzeno (µg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Índice de Fenóis (mg/L)	m,p-Xilenos (µg/L)	o-Xileno (µg/L)	Tolueno (mg/L)	Xilenos (mg/L)
VMP ¹	5	0,2	-	-	-	0,17	0,3
C-007	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-019	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-022	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-027	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-038	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-040	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003
C-042	< 1	< 0.001	< 0.001	< 2	< 1	< 0.001	< 0.003

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria nº 2914/2011

7.2.4 Qualidade das Águas para o Consumo Humano

No Brasil, a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Os parâmetros considerados na referida Portaria e analisados no âmbito do estudo constam na Tabela 7.8 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 7.9 (substâncias organolépticas).

Tabela 7.8 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011), avaliadas no presente estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Substâncias Inorgânicas		
Arsênio	mg/L	0,01
Bário	mg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005
Chumbo	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
Fluoreto	mg/L F	1,5
Mercúrio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,07
Nitrato	mg/L N	10,0
Nitrito	mg/L N	1,0
Substâncias Orgânicas		
Benzeno	µg/L	5
Agrotóxicos		
Carbenzadim + Benomil	µg/L	120
Clorpirifós + Clorpirifós-Oxon	µg/L	30
Diurrom	µg/L	90
Glifosato + Ampa	µg/L	500
Tebuconazol	µg/L	180

Tabela 7.9 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade, avaliadas no presente estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Amônia	mg/L NH ₃	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor aparente	uH	15
Dureza total	mg/L como CaCO ₃	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Sódio	mg/L	200
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000
Sulfato	mg/L	250
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	uT	5
Zinco	mg/L	5
Xilenos	mg/L	0,3

A avaliação dos resultados das análises químicas das amostras coletadas no âmbito do estudo em ambos os períodos amostrais, indicaram que os parâmetros STD, dureza, sódio, sulfato, cloreto, fluoreto, nitrato, ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras, conforme Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano, na área regional de Irecê.

Parâmetro	Seco (n=42)	Úmido (n=43)
STD	32 amostras (76%)	28 amostras (65%)
Dureza	33 amostras (79%)	34 amostras (79%)
Sódio	2 amostras (5%)	1 amostra (2%)
Sulfato	5 amostras (12%)	5 amostras (12%)
Cloreto	17 amostras (40%)	16 amostras (37%)
Fluoreto	3 amostras (7%)	7 amostras (16%)
Nitrato	38 amostras (67%)	25 amostras (58%)
Ferro	7 amostras (17%)	7 amostras (16%)
Manganês	4 amostras (10%)	amostras (9%)

7.2.5 Avaliações Isotópicas

As avaliações isotópicas foram realizadas por meio da caracterização dos isótopos ambientais de oxigênio e hidrogênio e radiogênico de estrôncio, em amostras de águas coletadas na rede monitoramento qualitativo definida no presente estudo. Foram coletadas 11 amostras na segunda campanha (período úmido), cujos resultados são apresentados na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Irecê.

Amostra	Situação	Oxigênio-18 (‰VSMOW)	Deutério (2H) (‰VSMOW)	Estrôncio (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)
C-006	Salitre	-4,42	-31,5	0,70839
C-009	Salitre	-4,23	-33,4	0,70840
C-010	Salitre	-2,07	-22,6	0,70859
C-015A	Salitre	-4,35	-30,1	0,72255
C-016	Salitre	-4,67	-32	0,70780
C-017	Salitre	-3,85	-24,7	0,70769
C-019	Salitre	-4,08	-26,1	0,71005
C-028	Salitre	-3,55	-22,6	0,71258
C-033	Salitre	-4,32	-27,8	0,70851
C-217	Morro do Chapéu	-4,51	-28,3	0,73680
C-040	Salitre	-3,66	-24,4	0,70844

7.2.5.1 Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério ($\delta^2\text{H}$)

As razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ estão representadas na Figura 7.17, juntamente com a reta meteórica mundial (RMM).

Todos os valores obtidos para o $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são negativos, o que demonstra que essas águas são águas empobrecidas em relação aos padrões VSMOW, isso se dá em resposta ao processo de progressiva depleção dos isótopos pesados pelo efeito continental (Gat, 1971), sugerindo que a origem dessas águas pode ser explicada pela evaporação das águas superficiais do Oceano Atlântico, cujos vapores são carregados pelos ventos predominantes de leste para oeste.

Observa-se que a maioria das amostras tem composição isotópica próxima à da linha meteórica mundial (RMM), confirmando sua origem meteórica. Isso indica que as águas não sofreram evaporação significativa. Como o ^{18}O e o deutério são nuclídeos estáveis, os valores obtidos são representativos das águas de chuvas da época da recarga. Como exceção, destacam-se as amostras C-009 e C-010, que se encontram mais distantes da RMM, indicando que essas águas sofreram evaporação durante o processo de infiltração.

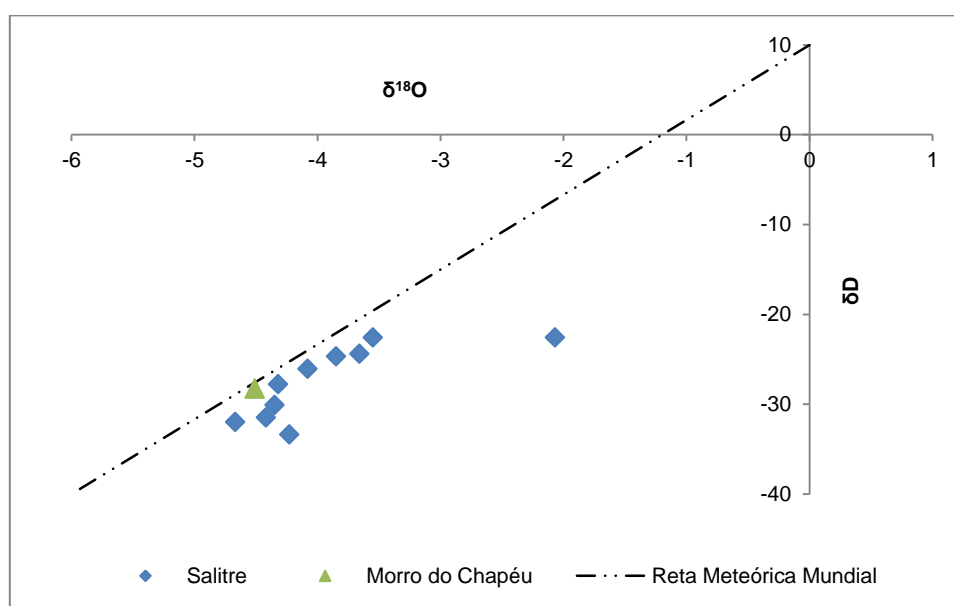


Figura 7.17: Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras.

7.2.5.2 Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

Na área de estudos foram realizadas análises de isótopos de estrôncio na segunda campanha de amostragem (período úmido), nos pontos indicados na Tabela 7.11 e visualizados na Figura 7.17.

Os poços C-006, C-009, C-010, C-016, C-017, C-033 e C-040 não apresentam coberturas clásticas cenozoicas e estão também distantes do contanto com o quartzito da Formação Morro do Chapéu. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas amostras

de água desses poços variaram de 0,70769 (C-017) a 0,70859 (C-010). No mesmo aquífero, entretanto, com cobertura clástica cenozoica presentes as razões variaram de 0,72255 (C-015A) e 0,71005 (C-019). Nota-se, portanto, um leve crescimento das razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para as águas do aquífero Salitre com coberturas clásticas cenozoicas, demonstrando um possível processo de mistura de água.

Em relação à amostra C-217, representante da água do quartzito Morro do Chapéu, a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,73680) é superior e mais radiogênica das demais razões, mostrando que a amostra não recebe qualquer influência das águas do aquífero Salitre. Isso é reforçado se considerarmos que a amostra C-040 próxima à amostra C-217 tem razão de 0,70844 e, portanto, bem inferior.

7.3 Hidrogeoquímica da Subárea Regional 2 - São Desidério

A Subárea regional 2 é mostrada na Figura 7.18. Corresponde ao extremo oeste do estado da Bahia, envolvendo litologias cársticas e fissuro-cársticas do Grupo Bambuí e, em menor proporção, litologias clásticas do Grupo Urucuia.

Na área Regional de São Desidério as amostras foram agrupadas de acordo com as características geológicas/hidrogeológicas, obtidas da análise dos perfis litológicos e construtivos dos poços amostrados.

Foram definidos dois grupos no aquífero Bambuí:

- Bambuí aflorante: Os poços desse grupo captam águas do aquífero Bambuí, cujo calcário encontra-se aflorante ou sobreposto a uma pequena espessura de solo. Nessa situação estão os seguintes poços: C-140, C-141, C-151, C-152, C-155, C-156, C-157, C-158, C-159, C-160, C-161, C-162, C-163, C-165, C-167, C-169, C-170, C-171, C-172, C-173, C-174, C-175, 175A, C-176, C-178, C-179 C-180, C-181, C-182, C-182A, C-183, C-184, C-186, C-187, C-188, C-189, C-190, C-193, C-194, C-195, C-196 e C-199.
- Bambuí com cobertura: Os poços desse grupo captam águas do aquífero Bambuí, que se encontra recoberto pelo Grupo Urucuia ou por unidades sedimentares com espessura de até 40 m. Nessa situação estão os seguintes poços: C-142, C-143, C-144, C-145, C-146, C-148, C-149 e C-153, C-154, C-164, C-166, C-168, C-177, C-185, C-191, C-192, C-197, C-198, C-200, C-201, C-202 e C-203.

Ainda, foram considerados os dados de um poço captando águas do aquífero Urucuia (C-147), de um poço misto captando, conjuntamente, águas dos aquíferos Urucuia e Bambuí (C-150), de uma cacimba com 25 metros de profundidade localizada área de afloramento do Grupo Urucuia (C-204), além das amostras de águas superficiais (C-205, C-206, C-207, C-208, C-209, C-210), que estão localizadas nas nascentes do Rio João Rodrigues, Rio Grande, Rio Cabeceira de Pedra, Rio da Mutamba e Poço do Surubim.

Ressalta-se que o critério de separar os poços em dois grupos distintos, com base, principalmente, da presença ou não da cobertura arenítica Urucuia é importante para verificar a influência dessa cobertura na evolução química das águas subterrâneas da área de estudo. A Figura 7.18 apresenta a localização das amostras supracitadas.

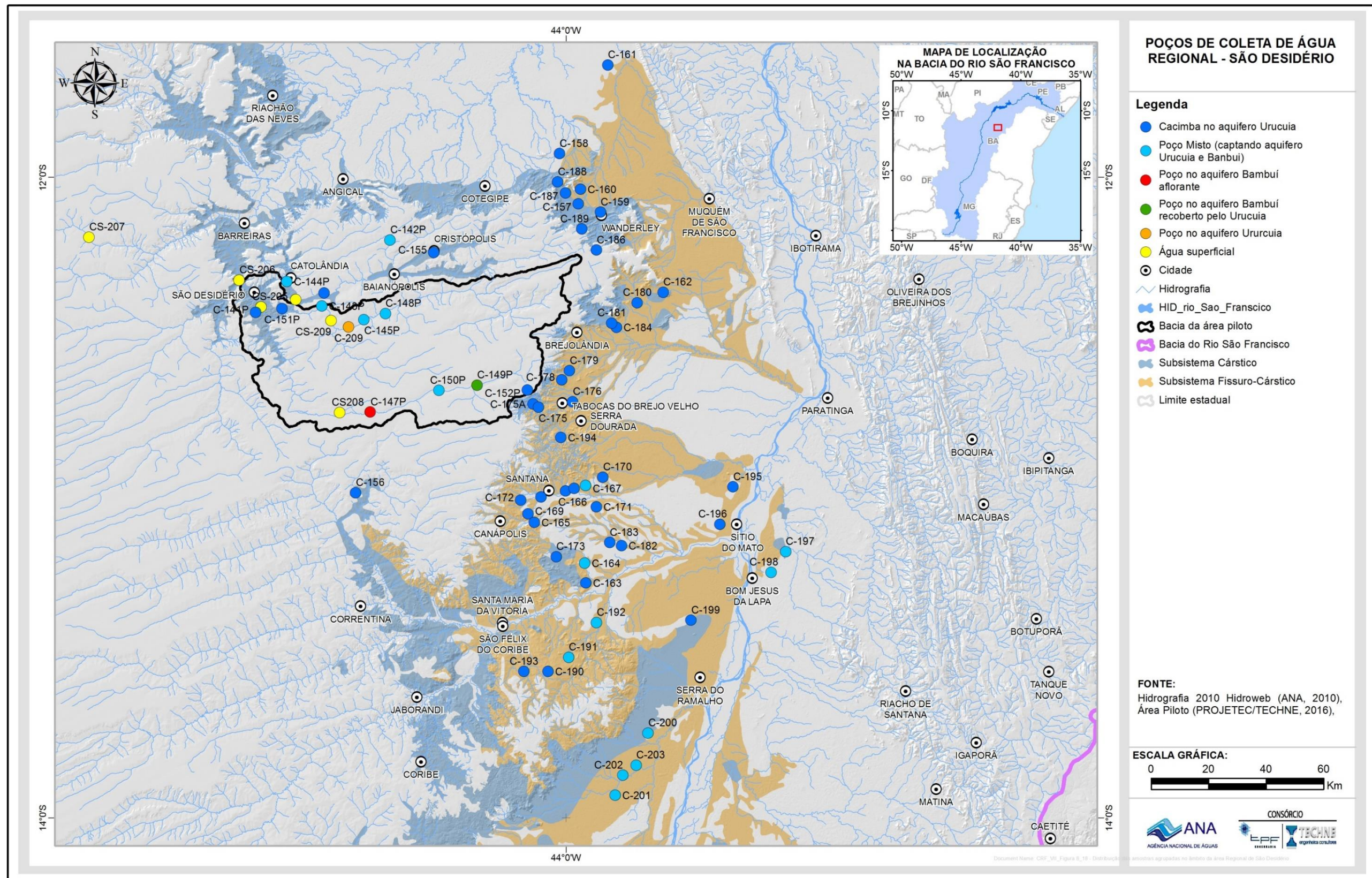


Figura 7.18: Distribuição das amostras agrupadas no âmbito da área Regional de São Desidério

7.3.1 Caracterização das Águas

A Tabela 7.12 e a Tabela 7.13 apresentam o sumário estatístico de cada grupo para ambos os períodos de amostragem.

Tabela 7.12 - Sumário estatístico das águas do Bambuí aflorante, coletadas nos períodos seco e úmido (n=40).

Variáveis	Período	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
pH in situ	seco	6,93	8,48	7,43	7,35	0,34	4,56	1,55
	úmido	7,01	8,22	7,44	7,38	0,26	3,52	1,21
T (°C) in situ	seco	23,60	31,30	27,21	27,20	1,44	5,30	7,70
	úmido	23,90	30,20	26,59	26,50	1,40	5,27	6,30
ORP (mV) in situ	seco	-138,70	202,90	103,75	128,45	76,89	74,12	341,60
	úmido	-210,50	224,40	134,32	153,30	79,21	58,97	434,90
CE (µS/cm) in situ	seco	328,00	2059,00	961,03	883,50	340,80	35,46	1731,00
	úmido	345,00	2084,00	1003,33	944,00	331,12	33,00	1739,00
STD (mg/L)	seco	222,00	1882,00	726,00	603,00	349,15	48,09	1660,00
	úmido	198,00	1626,00	675,15	646,50	276,56	40,96	1428,00
Dureza (mg/L)	seco	124,00	853,00	382,58	342,00	151,85	39,69	729,00
	úmido	124,00	1140,00	396,00	348,00	183,71	46,39	1016,00
Cálcio (mg/L)	seco	27,60	279,00	123,73	113,50	52,64	42,54	251,40
	úmido	30,00	310,00	131,06	123,50	56,04	42,76	280,00
Magnésio (mg/L)	seco	0,67	49,40	17,85	16,40	11,97	67,09	48,73
	úmido	1,50	88,00	16,58	12,95	15,12	91,22	86,50
Sódio (mg/L)	seco	1,34	232,00	48,28	33,55	47,07	97,49	230,66
	úmido	1,58	195,00	45,21	29,05	48,64	107,60	193,42
Potássio (mg/L)	seco	0,31	6,74	2,34	2,05	1,28	54,89	6,43
	úmido	0,30	8,25	2,45	2,23	1,41	57,74	7,95
Bicarbonato (mg/L)	seco	175,00	500,00	375,90	380,00	62,95	16,75	325,00
	úmido	181,00	481,00	368,33	373,50	60,93	16,54	300,00
Sulfato (mg/L)	seco	0,50	756,00	87,60	43,80	129,06	147,32	755,50
	úmido	0,25	1000,00	98,80	39,95	176,83	178,98	999,75
Cloreto (mg/L)	seco	1,20	256,00	55,48	31,60	52,14	93,99	254,80
	úmido	1,42	127,00	51,84	45,60	38,78	74,80	125,58
Fluoreto (mg/L)	seco	0,05	4,46	0,54	0,29	0,90	166,33	4,41
	úmido	0,03	3,54	0,45	0,25	0,59	132,11	3,52
Fosfato (mg/L P)	seco	-	-	-	-	-	-	-
	úmido	0,01	0,08	0,02	0,01	0,02	117,91	0,08
Nitrato (mg/L N)	seco	0,15	10,10	2,09	1,41	2,20	105,46	9,95
	úmido	0,25	7,95	2,02	1,49	2,04	101,03	7,70

Tabela 7.12 - Sumário estatístico das águas do Bambuí aflorante, coletadas nos períodos seco e úmido (n=40) – Continuação.

Variáveis	Período	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
Nitrito (mg/L N)	seco	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	72,99	0,05
	úmido	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Amônia (mg/L NH3)	seco	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
	úmido	0,05	0,22	0,05	0,05	0,03	50,35	0,17
Ferro (mg/L)	seco	0,01	3,63	0,38	0,06	0,74	196,75	3,62
	úmido	0,01	36,10	1,73	0,09	6,73	390,19	36,09
Manganês (mg/L)	seco	0,00	1,47	0,09	0,00	0,32	346,14	1,47
	úmido	0,00	0,41	0,03	0,00	0,09	260,78	0,41

Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

Tabela 7.13 – Sumário estatístico das águas do Bambuí com cobertura, coletadas no período seco e úmido (n=22).

Variáveis	Período	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
pH in situ	seco	7,09	8,18	7,60	7,60	0,25	3,26	1,09
	úmido	7,12	8,04	7,61	7,61	0,25	3,30	0,92
T (°C) in situ	seco	24,00	29,40	26,54	26,50	1,12	4,22	5,40
	úmido	24,00	30,00	26,52	26,70	1,45	5,46	6,00
ORP (mV) in situ	seco	-89,30	436,00	133,72	147,30	103,16	77,15	525,30
	úmido	-68,30	221,40	141,88	147,30	72,17	50,87	289,70
CE (µS/cm) in situ	seco	237,00	934,00	601,68	584,00	182,65	30,36	697,00
	úmido	309,00	1958,00	727,59	720,00	331,60	45,58	1649,00
STD (mg/L)	seco	163,00	739,00	420,23	409,00	138,49	32,96	576,00
	úmido	140,00	735,00	408,55	384,50	151,66	37,12	595,00
Dureza (mg/L)	seco	129,00	386,00	255,77	236,50	69,83	27,30	257,00
	úmido	95,40	395,00	240,38	220,50	79,09	32,90	299,60
Cálcio (mg/L)	seco	44,10	126,00	86,20	80,80	24,74	28,70	81,90
	úmido	31,30	123,00	79,48	78,10	27,89	35,09	91,70
Magnésio (mg/L)	seco	1,56	22,70	9,77	7,97	6,47	66,25	21,14
	úmido	2,15	23,10	10,10	8,92	6,09	60,31	20,95
Sódio (mg/L)	seco	2,60	99,90	21,08	11,30	22,92	108,71	97,30
	úmido	1,90	49,30	17,78	13,05	14,28	80,34	47,40
Potássio (mg/L)	seco	0,64	5,70	2,27	1,91	1,38	60,91	5,06
	úmido	0,42	5,94	2,52	2,13	1,62	64,14	5,52
Bicarbonato (mg/L)	seco	132,00	408,00	271,73	259,50	76,45	28,14	276,00
	úmido	124,00	391,00	262,50	247,00	77,64	29,58	267,00

Tabela 7.13 – Sumário estatístico das águas do Bambuí com cobertura, coletadas no período seco e úmido (n=22) – Continuação.

Variáveis	Período	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
Sulfato (mg/L)	seco	0,50	62,50	16,46	7,35	19,09	115,93	62,00
	úmido	0,50	55,60	15,99	6,70	18,04	112,80	55,10
Cloreto (mg/L)	seco	1,95	142,00	34,15	24,75	33,91	99,29	140,05
	úmido	2,50	91,60	27,60	22,50	22,43	81,24	89,10
Fluoreto (mg/L)	seco	0,03	0,84	0,24	0,13	0,27	113,40	0,82
	úmido	0,05	0,99	0,39	0,22	0,34	88,12	0,94
Fosfato (mg/L P)	seco	-	-	-	-	-	-	-
	úmido	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	98,37	0,04
Nitrato (mg/L N)	seco	0,15	10,70	2,04	0,88	2,78	136,24	10,55
	úmido	0,25	12,90	1,75	0,38	2,94	167,99	12,65
Nitrito (mg/L N)	seco	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	62,79	0,03
	úmido	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Amônia (mg/L NH ₃)	seco	0,05	0,27	0,06	0,05	0,05	79,06	0,22
	úmido	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Ferro (mg/L)	seco	0,00	1,92	0,24	0,05	0,50	210,65	1,92
	úmido	0,00	3,65	0,45	0,08	0,84	186,92	3,65
Manganês (mg/L)	seco	0,00	0,89	0,08	0,00	0,20	243,83	0,89
	úmido	0,00	0,66	0,05	0,00	0,14	264,79	0,66

Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

Amostras do Bambuí aflorante

As amostras de águas dos poços inseridos no Bambuí aflorante apresentam como característica principal uma mineralização pouco expressiva, quando comparadas com outras águas típicas de aquíferos cársticos. Para a maioria das amostras os valores encontrados para STD, nos dois períodos de coleta, foram abaixo de 1000 mg/L (Tabela 7.13). Teores acima de 1000 mg/L foram registrados em oito poços (C-158, C-159, C-160, C-161, C-162, C-176, C-178, C-180, C-182) no período seco. As águas são, portanto, classificadas como doces, predominantemente, com casos isolados de ligeiramente salobras (C-158, C-159, C-160, C-161, C-176, C-178, C-180, C-182), conforme a classificação de McNeely *et. al* (1979). No período úmido, os valores de STD nas águas dos poços amostrados variaram de 198,00 (C-156) a 1626,00 mg/L (C-159), com média de 675,00 mg/L. No período seco ocorreu um discreto aumento de mineralização com valores variando de 222,00 (C-156) a 1882,00 mg/L (C-159) e média de 726,00 mg/L (Tabela 7.12). Registra-se, que os valores maiores de STD estão notadamente posicionados na faixa leste da área (triângulos vermelhos na Figura 7.19). Os teores de STD das águas do Bambuí aflorante são controlados, principalmente, pela dureza, cloreto, cálcio e sulfato, conforme os respectivos diagramas de dispersão que indicam correlações positivas fortes a moderadas (Figura 7.20 a Figura 7.23).

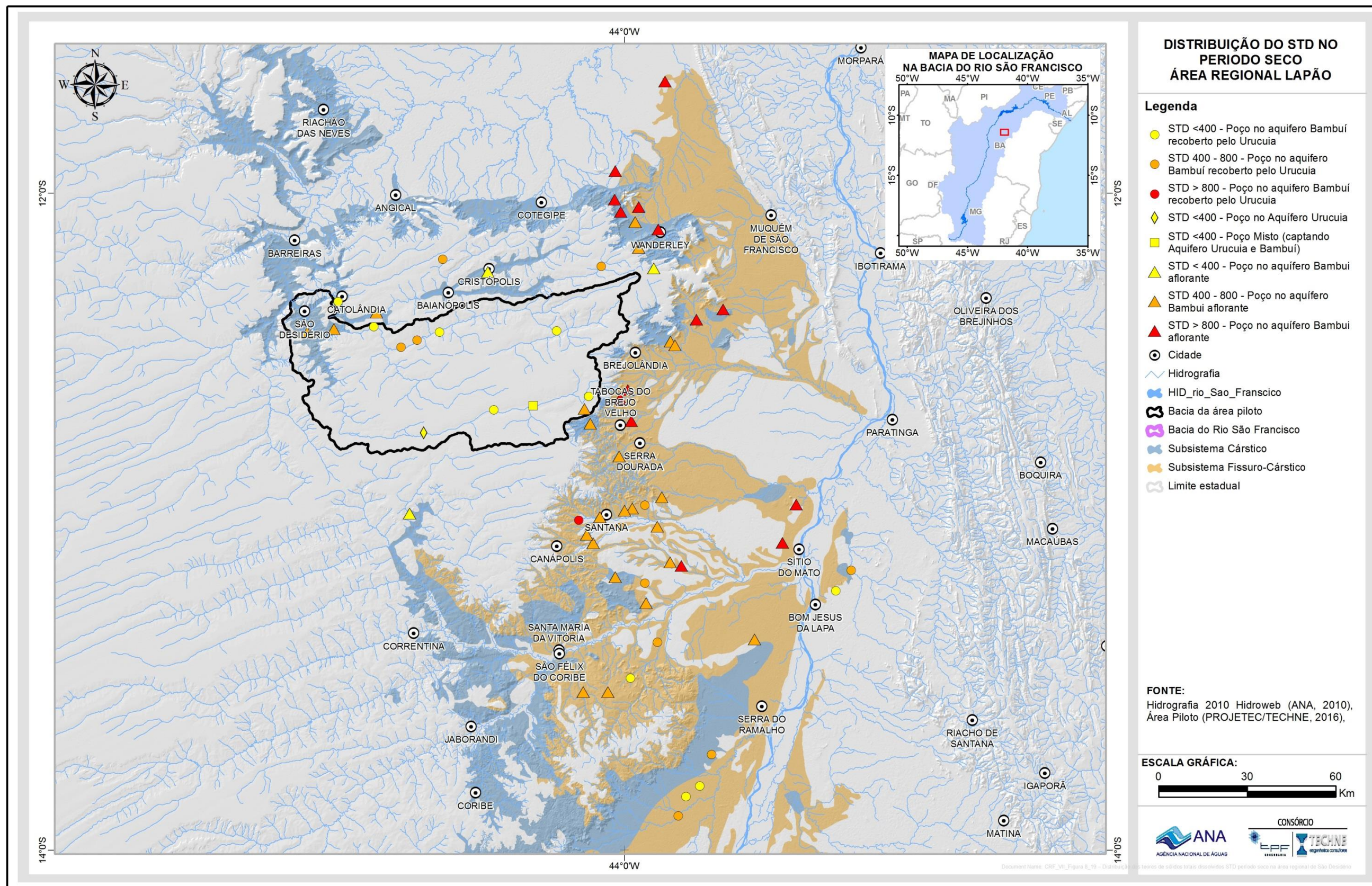


Figura 7.19: Distribuição dos teores de sólidos totais dissolvidos (STD), período seco na área regional de São Desidério.

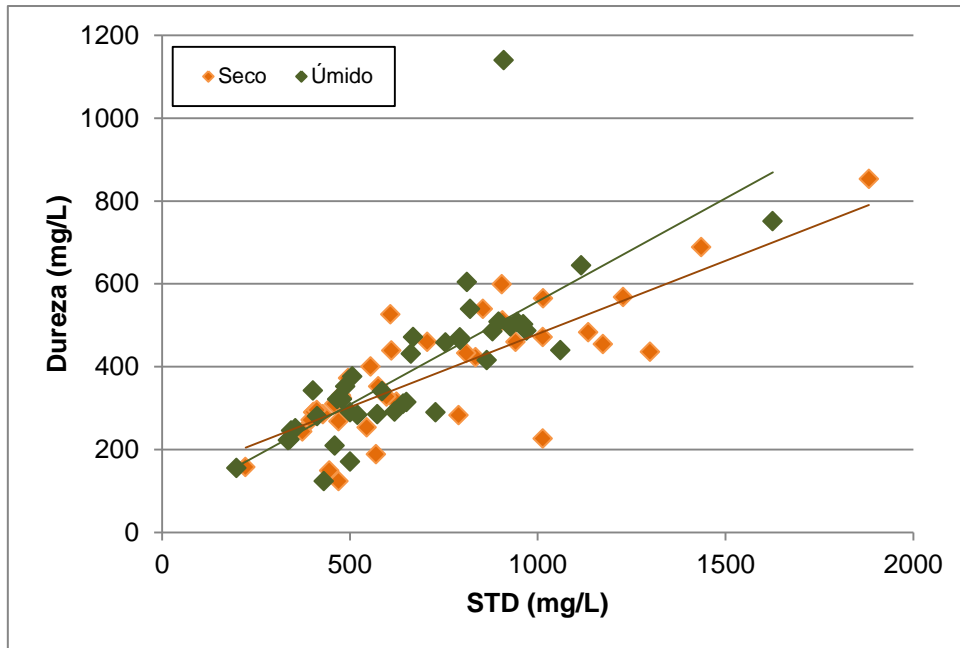


Figura 7.20: Correlação entre STD e dureza para as águas do Bambuí aflorante nos períodos seco e úmido.

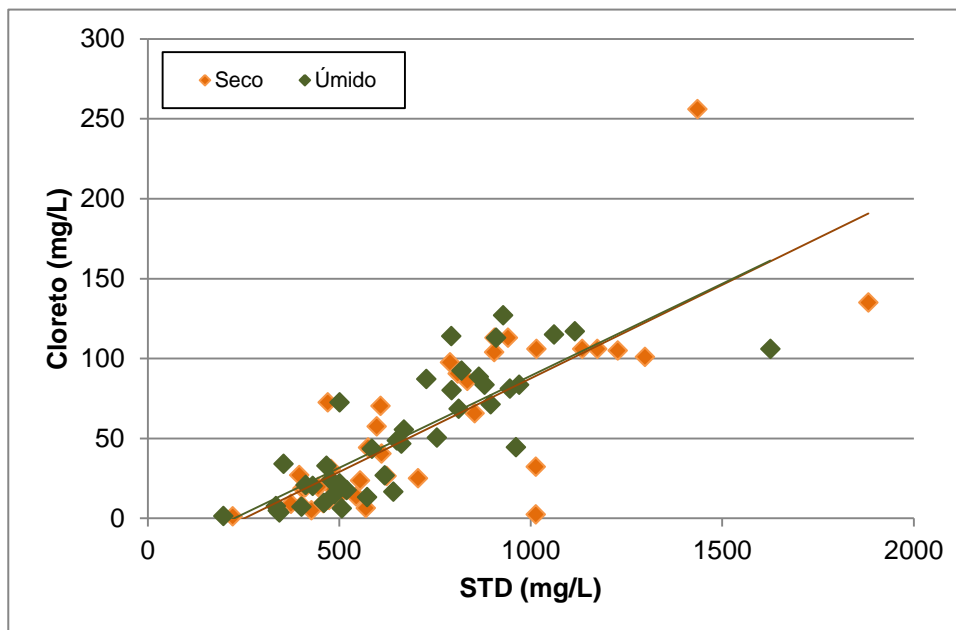


Figura 7.21: Correlação entre STD e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido

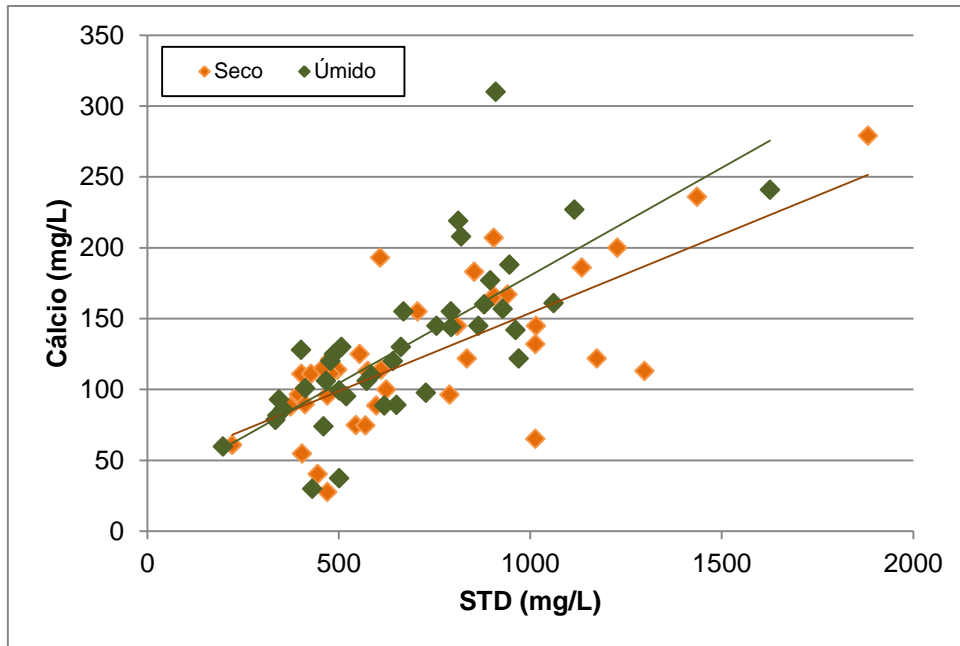


Figura 7.22: Correlação entre STD e cálcio para as águas do Bamboú aflorante, nos períodos seco e úmido.

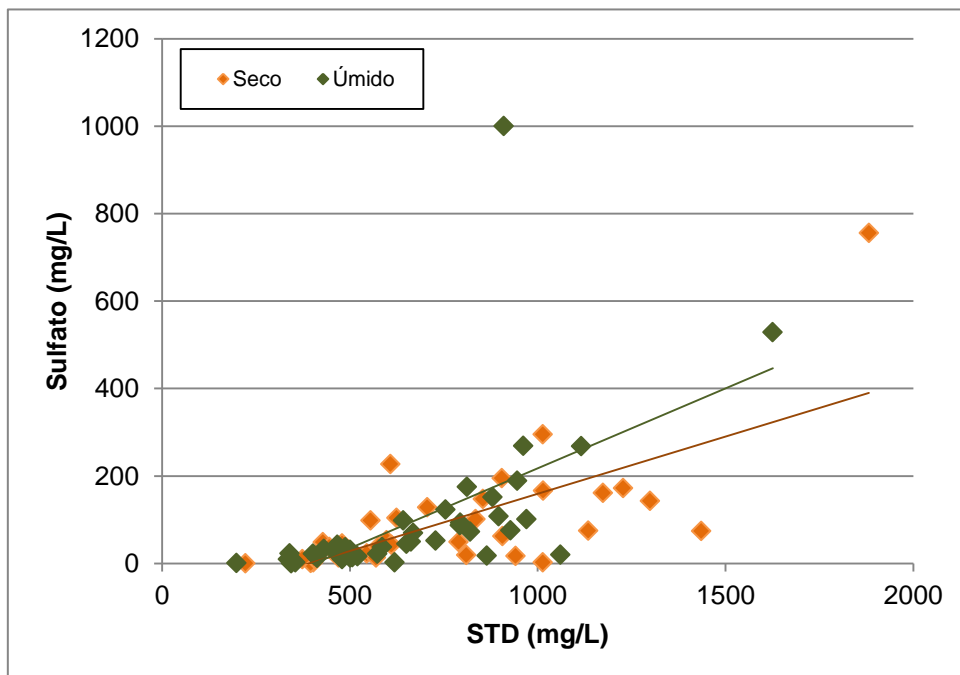


Figura 7.23: Correlação entre STD e sulfato para as águas do Bamboú aflorante, nos períodos seco e úmido.

Os valores pH do Bamboú aflorante ficaram compreendidos no intervalo de 6,93 (C-158) a 8,48 (C-167), no período seco, enquanto que no úmido os intervalos variaram de 7,01 (C-159) a 8,22 (C-167). Nota-se que, portanto, nenhum caso com valores abaixo de 6,5, conferindo um domínio levemente neutro a alcalino

para essas águas, relacionado certamente a expressiva concentração de bicarbonatos nas amostras.

Com relação aos teores da dureza, as águas do aquífero Bambuí aflorante mostram variação no período seco de 124,00 (C-124) a 853,00 mg/L de CaCO_3 (C-159), com média de 382,58 mg/L de CaCO_3 . No período úmido ocorre uma leve elevação dos teores com um mínimo de 124,00 (C-184) e um máximo de 1140,00 mg/L de CaCO_3 (C-159), com média de 396,00 mg/L de CaCO_3 (Tabela 7.12). Os maiores valores da dureza estão localizados na faixa leste da área (triângulos vermelhos da Figura 7.24), seguindo a mesma tendência do STD (ver Figura 7.19).

Com relação aos teores da dureza, as águas do aquífero Bambuí aflorante mostram variação no período seco de 124,00 (C-124) a 853,00 mg/L de CaCO_3 (C-159), com média de 382,58 mg/L de CaCO_3 . No período úmido ocorre uma leve elevação dos teores com um mínimo de 124,00 (C-184) e um máximo de 1140,00 mg/L de CaCO_3 (C-159), com média de 396,00 mg/L de CaCO_3 (Tabela 7.12). Os maiores valores da dureza estão localizados na faixa leste da área (triângulos vermelhos da Figura 7.24), seguindo a mesma tendência do STD (ver Figura 7.19).

Essas águas se enquadram, portanto, como duras a muito duras, segundo a classificação de Custódio & Llamas, 2001. Ressalta-se que a dureza nas águas do aquífero Bambuí aflorante é função, principalmente, das concentrações do cálcio, cloreto e sulfato, conforme os respectivos diagramas de dispersão que indicam correlações positivas fortes a moderadas (Figura 7.25 a Figura 7.27).

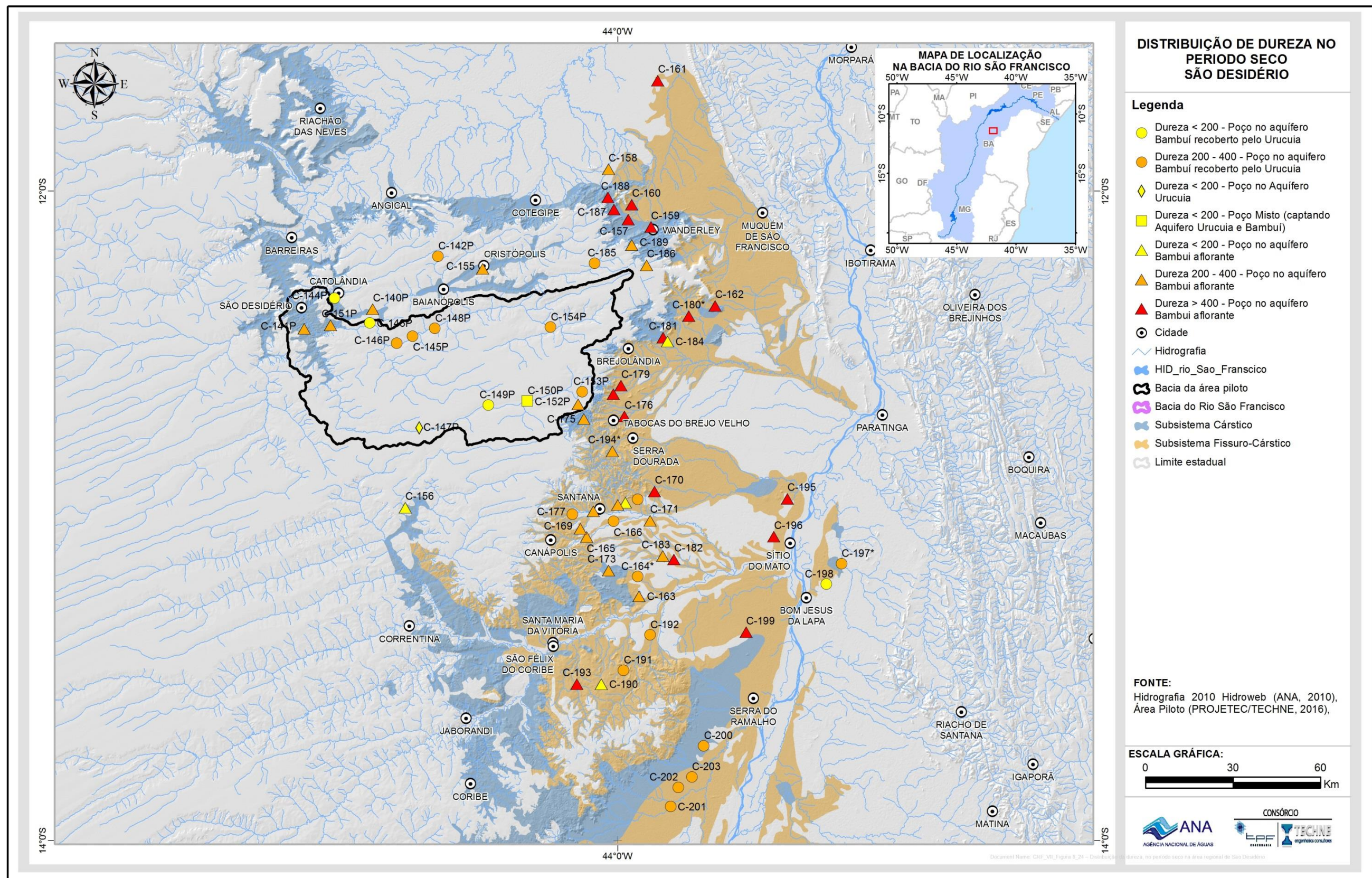


Figura 7.24: Distribuição da dureza, no período seco, na área regional de São Desidério

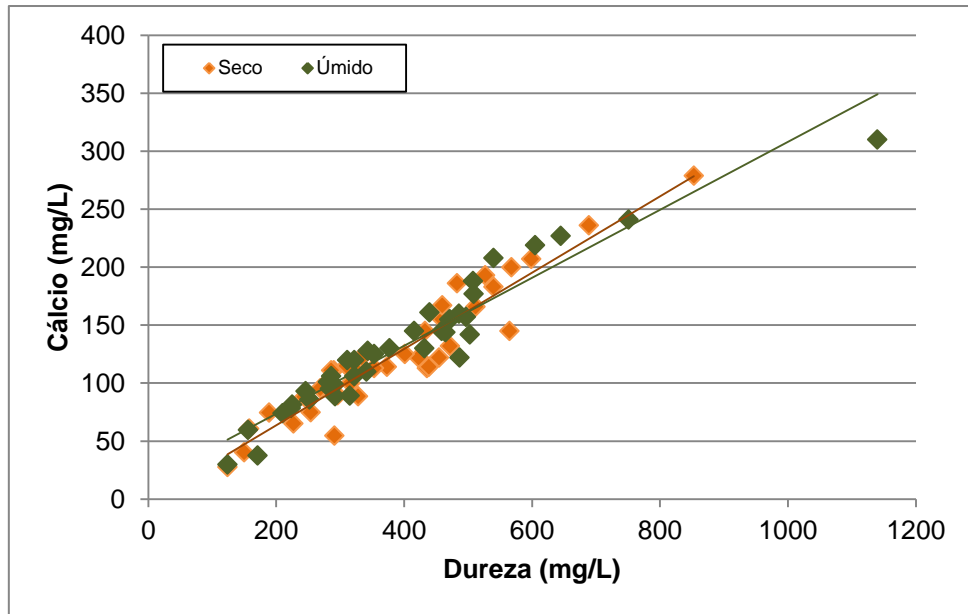


Figura 7.25: Correlação entre dureza e cálcio para as águas do Bambugi aflorante, para os períodos seco e úmido.

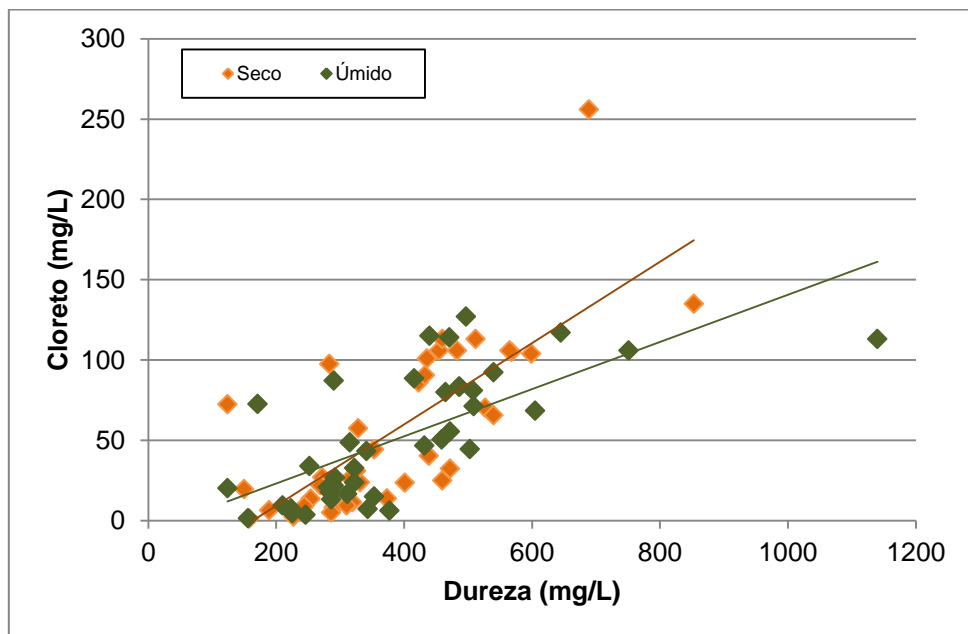


Figura 7.26: Correlação entre dureza e cloreto para as águas do Bambugi aflorante, para os períodos seco e úmido

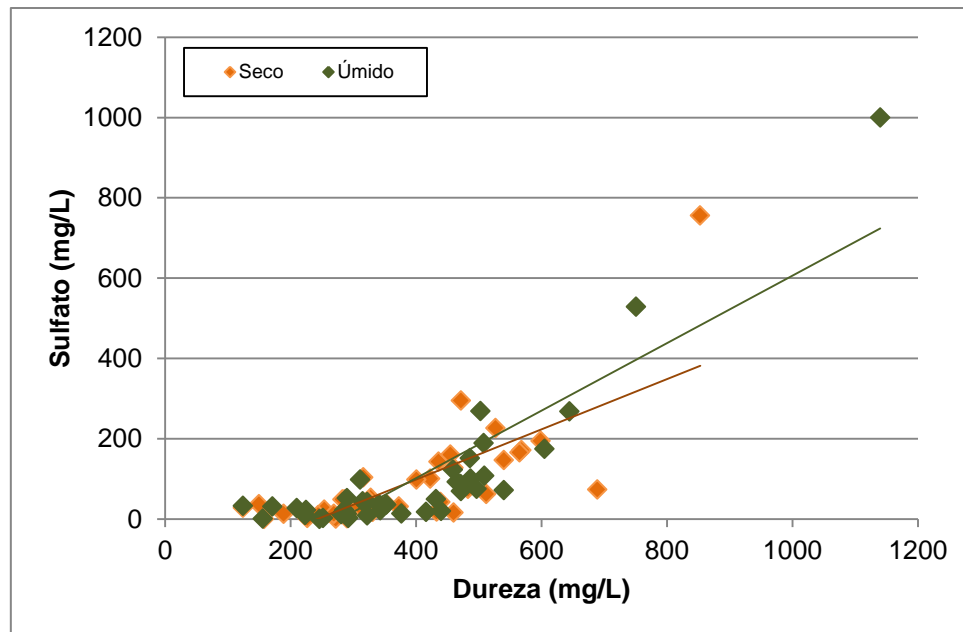


Figura 7.27: Correlação entre dureza e sulfato para as águas do Bambuí

Com relações aos constituintes secundários, o ferro se destaca nas águas do aquífero Bambuí aflorante, com teores elevados em pontos isolados, chegando até 36,10 mg/L, no poço C-169, no município de Santana, na porção sudeste da área (Figura 7.19). A ocorrência do ferro nas águas do aquífero Bambuí aflorante pode estar relacionada à corrosão do revestimento dos poços. Não fica descartada, entretanto, a origem litológica desses elementos, já que alguns minerais carbonáticos têm ferro na sua composição.

Manganês nas águas do aquífero Bambuí aflorante evidenciaram teores predominantemente baixos (Tabela 7.12). Alguns poços, entretanto, mostram teores acima de 0,3 mg/L. Nos poços C-141 e C-190, localizados respectivamente nos municípios de Catolândia e São Félix do Coribe, os teores ficam próximo a 1,50 mg/L, no período seco. A origem do manganês nas águas estudadas, particularmente nos poços C-141 e C-190, ainda não é conclusiva nesse estudo.

A presença de nitrogênio nas águas subterrâneas pode indicar contaminação dessas águas por nitrato (NO_3^-). Compostos nitrogenados como a amônia (NH_4^+), podem oxidar-se para nitrito (NO_2^-), que em seguida é convertido em nitrato (NO_3^-), fase final e estável do nitrogênio, que ocorre através do processo microbiano da nitrificação (Zublena *et al.*, 2001). Nas águas do aquífero Bambuí aflorante a presença do nitrogênio nas três formas (amônia, nitrito e nitrato) ocorrem de forma discreta, com um poço apenas com teor de 10,1 mg/L N (C-188). Os compostos nitrogenados, portanto, não contribuem de forma efetiva nos processos antrópicos que atuam nessas águas.

O fluoreto é outro constituinte secundário nas águas do aquífero Bambuí, que mostra teores predominante baixos, com média de 0,54 mg/L e 0,45 mg/L, respectivamente para o período seco e úmido (Tabela 7.12). As águas do poço

C-167, no município de Santana, no entanto, apresentam valores anômalos para esse elemento, alcançando até 4,46 mg/L no período seco e 3,54 mg/L, no período úmido. A origem do fluoreto, em altas concentrações nas águas deste poço, ainda não tem uma proveniência conclusiva, podendo ter origem geogênica ou antrópica. É mais provável, entretanto, uma causa geogênica, já que nos calcários do Grupo Bambuí é comum a ocorrência de fluorita, conforme relatados em Silva (1987), Martins (2001) e Gonçalves *et. al* (2011). Na Serra do Ramalho, Schio (2013) também relata a presença de flúor na água de poços da região de Santana. Segundo esses autores, a dissolução da fluorita pode ser a principal fonte de fluoreto das águas subterrâneas.

7.3.1.1 Amostras do Bambuí com cobertura

As águas do Bambuí com cobertura são pouco mineralizadas, a exemplo do Bambuí aflorante. De acordo com a Tabela 7.13, nas águas do Bambuí com cobertura, o STD variou entre 163,00 (C-143) e 739,00 mg/L (C-149), com média de 420,00 mg/L e mediana de 409,00 mg/L, no período seco. No período úmido variou entre 140 (C-143) e 735,00 mg/L (C-146), com média e mediana, respectivamente de 408,55 mg/L e 384,50 mg/L. Comparando-se os resultados obtidos nos dois períodos, ambos inseridos no mesmo ambiente hidrogeológico, nota-se um leve crescimento dos teores de STD no período seco. Essa observação pode estar relacionada à baixa pluviometria do período seco, que favorece a concentração dos íons que estavam em solução.

A distribuição STD no período seco está ilustrada na Figura 7.19, nota-se um predomínio dos teores entre 400 a 800 mg/L, que estão posicionados de forma dispersa na área. Em relação à classificação quanto à quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) por unidade de volume de água (Mcneely *et al.* 1979) as águas do aquífero Bambuí recoberto são dominante doces, com todas as amostras com valores abaixo de 1000 mg/L

A Figura 7.28 ilustra o comportamento dos valores de STD, nos dois períodos para o Bambuí aflorante e Bambuí com cobertura. O gráfico mostra que não existem variações expressivas entre os períodos de amostragem. Isso é evidenciado pela forte correlação positiva e pelos valores de média e mediana relativamente similar (Tabela 7.12 e Tabela 7.13). O gráfico ilustra, também, que os valores de STD no aquífero Bambuí recoberto são, no geral, menores, do que os registrados para no Bambuí aflorante. Este fato pode estar associado à presença da cobertura arenítica do Grupo Urucua que, certamente contribui para o quimismo dessa água. Uma exceção ocorre no poço C-146, cuja água apresentou um valor elevado de STD (735 e 739 mg/L, respectivamente, no período seco e úmido). Nesse caso, é provável que a presença das camadas argilosas na cobertura arenítica esteja contribuindo para a maior concentração iônica dessas águas.

O gráfico da Figura 7.28 mostra ainda, de forma geral, uma forte correlação positiva entre os valores de STD nos dois períodos amostrais, indicando pequenas variações entre as amostras. Nove amostras do Bambuí aflorante (C-158, C-159, C-160, C-161, C-162, C-176, C-178, C-180 e C-182)

apresentam valores enriquecidos no período seco (com teores acima de 1000 mg/L) em relação ao úmido.

Uma discussão importante é o estudo das unidades de cobertura (sobre o Bambuí) e sua relação com os teores de STD. Parece claro que coberturas significativas de arenitos Urucuia (C-143, C-144, C-148, C-149, C-153, e C-203) contribuem para uma queda nos teores de STD das amostras de água. Nota-se, entretanto, a existência de poços com cobertura representativa, mas com teores relativamente altos de STD (C-146, C-166 e C-177). Esses casos podem ser, a princípio, explicados pelo caráter heterogêneo da cobertura com arenitos Urucuia intercalando com horizontes argilosos e carbonáticos. Por outro lado, amostras de Bambuí sem cobertura e com teores relativamente baixos de STD (C-140, C-155, C-156, C-163, C-184 e C-186) podem ser consequência de diversos fatores como tipo do calcário (mais arenoso), contato com a Formação Urucuia, diluição por fluxo regional e influência (proximidade) de drenagens superficiais (rios).

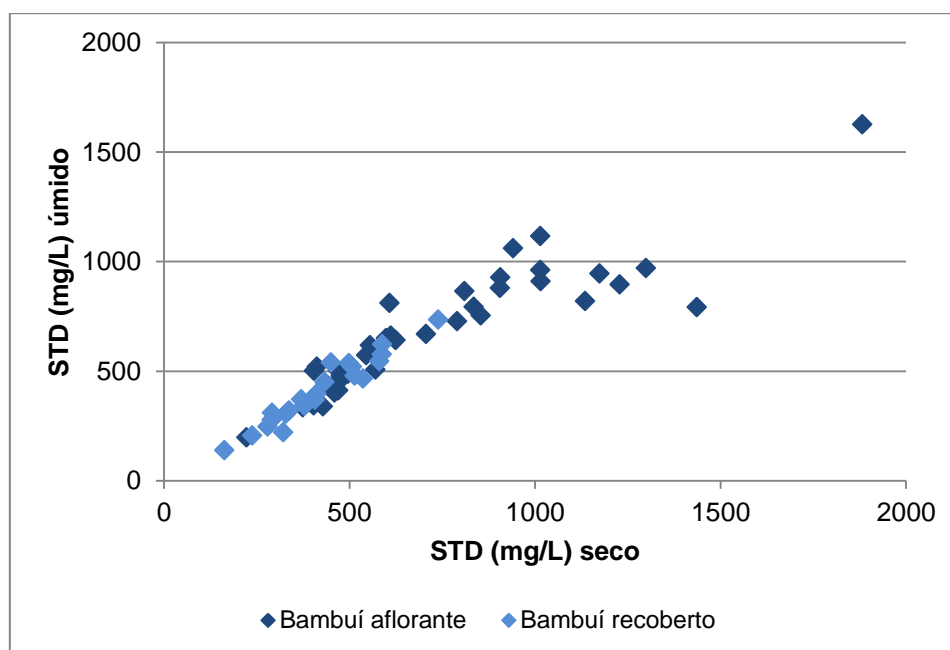


Figura 7.28: Correlação entre STD (seco) e STD (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto.

No Bambuí com cobertura os valores de pH estão variando entre 7,09 (C-142) a 8,18 (C-143), com média de 7,76, para o período seco, enquanto que no período úmido variaram de 7,12 (C-142) a 8,04 (C-143), com média de 7,73 (Tabela 7.13). Esses resultados caracterizam essas águas como neutras a alcalinas, não havendo variações significativas dos valores de pH entre os períodos de amostragem, conforme demonstrado no sumário estatístico.

Em relação à dureza o aquífero Bambuí recoberto registra no período seco um mínimo de 129,00 (C-143) e um máximo de 386,00 mg/L (C-166), com média de 255,77. No período úmido o teor mínimo da dureza foi de 95,40 (C-148) e o máximo de 395,00 mg/L (C-166), com média de 240,38 mg/L. As águas são,

portanto, predominantemente muito dura com alguns casos de água dura, conforme a classificação de Custódio & Llamas (2001). Apenas um poço (C-148) apresenta água pouco dura.

Os resultados da dureza do aquífero Bambuí recoberto se mostram, no geral, discretamente mais baixos do que no aquífero Bambuí aflorante, conforme ilustrado na Figura 7.24 e no diagrama de dispersão da Figura 7.29. A Figura 7.29 mostra ainda, para maioria das amostras, uma correlação fortemente positiva entre valores de dureza nos dois períodos amostrais. Existem, entretanto, amostras de Bambuí aflorante que registram diferenças relativamente expressivas entre os períodos. Nota-se, especialmente, duas amostras com teores nitidamente mais altos no período úmido em relação ao seco, com resultados de 645 x 227 mg/L (C-158) e de 1140 x 565 mg/L (C.180).

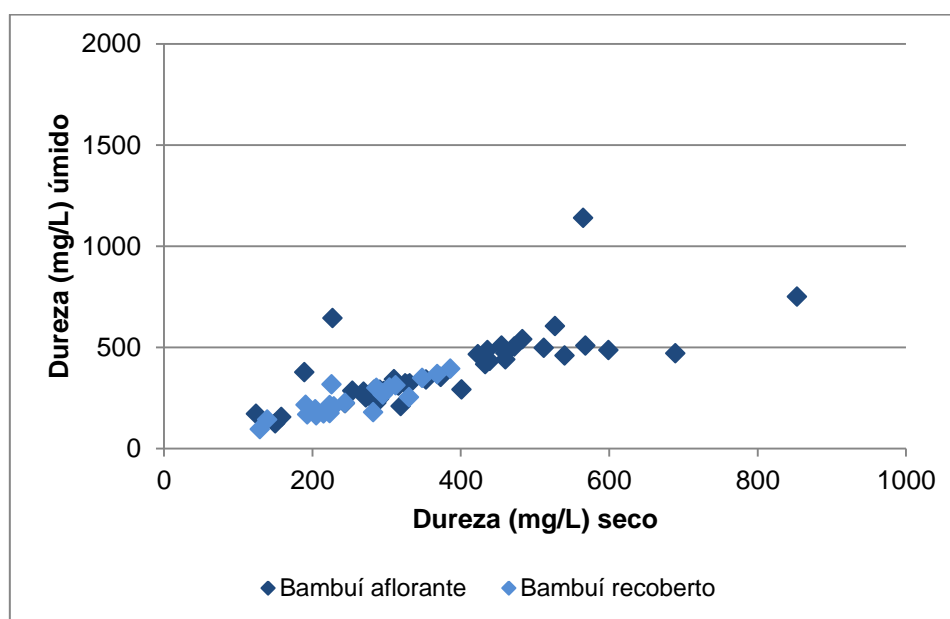


Figura 7.29: Correlação entre dureza (seco) e dureza (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido.

Os constituintes secundários flúor, ferro e nitrato ocorrem, geralmente, em teores baixos nas águas do Bambuí recoberto, com poucas amostras com teores anômalos. Para o flúor, os resultados foram sempre inferiores a 1,0 mg/L nos dois períodos de amostragem, inclusive com grande parte das amostras próximas ou no limite de quantificação do método de análise.

Os resultados do nitrato para o período seco variaram de 0,15 (C-153, C-154, C-191, C-198 e C-201) a 10,70 mg/L (C-185), com média de 2,04 mg/L. No período úmido os teores variaram de 0,25 (C-143, C-144, C-148, C-153, C-154, C-168, C-192, C-198, C-200, C-201 e C-203) a 12,90 mg/L (C-185). Nota-se que apenas a água de um poço (C-185), no município de Cristópolis, mostra teor significativo de nitrato. Os demais resultados foram baixos ou no limite de detecção.

A ocorrência do ferro e manganês nas águas do Bambuí recoberto apresenta teor predominante baixo. No período seco variou de abaixo do limite de quantificação a 1,92 mg/L (C-148), com média de 0,24 mg/L; no período úmido os valores oscilaram abaixo do limite de detecção a 3,65 mg/L (C-164), com média de 0,45 mg/L. (Tabela 7.13). Alguns poços (C-148 e C-152) e (C-142, C-153, C-164) mostram valores elevados de ferro, respectivamente no período seco e úmido. A presença do ferro nessas águas pode estar relacionada à corrosão dos revestimentos dos poços. Não fica descartada a origem litológica desses elementos, já que alguns minerais carbonáticos tem ferro na sua composição.

7.3.1.2 Amostras Poço Urucuia e Poço Misto

A Tabela 7.14 mostra os resultados das amostras de água dos poços completados no aquífero Urucuia (C-147) e do poço misto (C-150) captando água tanto no aquífero Urucuia quanto no aquífero Bambuí.

O poço no Urucuia mostra uma água pouco mineralizada, com valores STD baixos nos dois períodos de coleta (48 a 17 mg/L) e pH levemente ácido. Percebe-se, entretanto, uma significativa elevação dos teores do cálcio e bicarbonato no período úmido, tornando as águas muito duras nesse período, conforme a classificação de Custódio & Llamas (2001) (Tabela 7.14).

A água do poço misto mostra pequena variação dos teores STD entre os períodos de coletas (241 a 203 mg/L), sendo mais mineralizada quando comparada com a água do poço no Urucuia. O pH medido é levemente neutro. Os íons dominantes bicarbonato e cálcio e os demais íons não apresentam variações expressivas dos teores entre os dois períodos. A água do poço misto é classificada como dura, conforme a classificação de Custódio & Llamas (2001) (Tabela 7.14).

Tabela 7.14 – Resultados físico-químico e químico das águas do poço Urucuia e do poço Misto, no período seco e úmido.

Parâmetros	Período	C-147 Urucuia	C-150 Misto
pH	Seco	6,5	7,97
	úmido	6,76	7,75
STD	Seco	48	241
	Úmido	17	203
Dureza (mg/L)	Seco	4,64	162
	Úmido	382	155
Cálcio (mg/L)	Seco	1,67	62,1
	Úmido	117	55
Magnésio (mg/L)	Seco	0,113	1,69
	Úmido	21,6	4,4
Sódio (mg/L)	Seco	0,309	2,14
	Úmido	9,53	5,23
Potássio (mg/L)	Seco	0,458	0,55
	Úmido	3,02	1,13
Bicarbonato (mg/L)	Seco	7,7	195
	Úmido	507	200
Cloreto (mg/L)	Seco	0,517	3,62
	Úmido	0,56	4,36
Sulfato (mg/L)	Seco	0,25	0,5
	Úmido	0,25	0,71

7.3.2 Caracterização de grupos através de diagramas Box & Whisker

Para uma melhor compreensão e visualização das características dos agrupamentos de poços definidos no item 2.3, foram construídos diagramas de *Box & Whisker* (também chamados de *box plot*) para dois parâmetros considerados representativos dessa individualização.

A Figura 7.30 representa o diagrama de STD (mg/L), no período seco e úmido, respectivamente, para cada grupo. Da análise conjunta dos diagramas pode-se observar que os valores de médias e medianas mais altos ocorrem para o Bambuí aflorante e os mais baixos para o aquífero Urucuia (que tem apenas uma amostra em cada período). O poço misto e a cacimba apresentam comportamento semelhante entre eles, e resultados intermediários quando

comparados ao *box plot* do Bambuí aflorante e resultado do aquífero Urucuia. De forma semelhante estão os valores de médias e medianas do aquífero Bambuí com cobertura; isto é, com resultados inferiores ao Bambuí aflorante e superiores ao Urucuia, apontando para a influência das coberturas areníticas do Urucuia na queda dos teores de STD desse grupo.

Nos *box plots* da dureza para os dois períodos de amostragem (Figura 7.31) observa-se um comportamento similar ao do STD. Os poços do Bambuí aflorante são individualizados por apresentarem maiores teores e, conseqüentemente médias e medianas mais significativas. Para o aquífero Bambuí com cobertura esses resultados são sensivelmente inferiores ao Bambuí aflorante e similar ao poço do misto. Por outro lado, o poço no Urucuia (aquífero poroso) apresentam valores relativamente expressivos para a dureza.

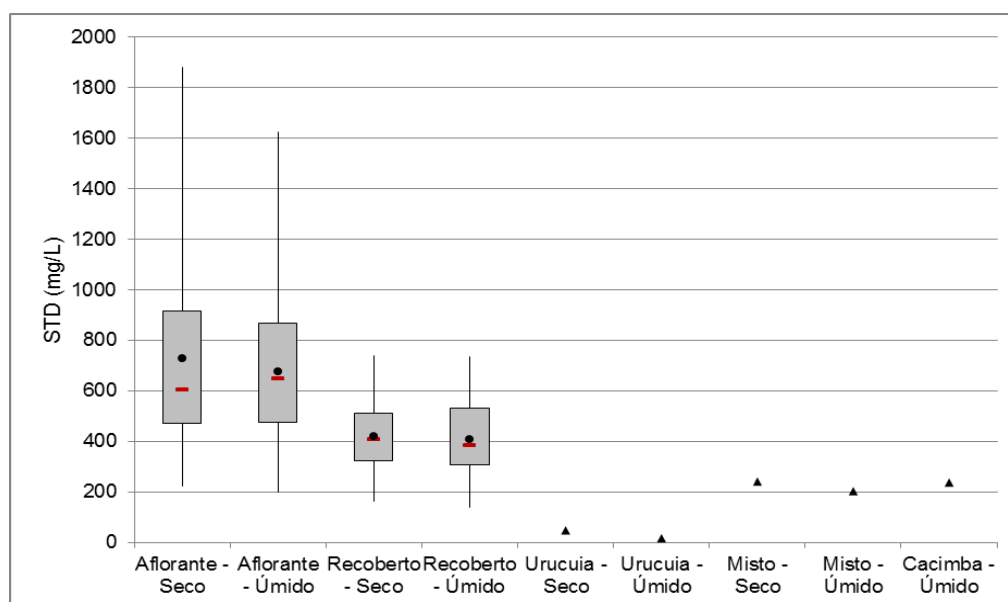


Figura 7.30: Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.

* A bola preta representa a média e a linha horizontal a mediana. A caixa cinza representa a amplitude interquartil e a linha vertical a amplitude interlimiar. Os poços no Urucuia, Misto e Cacimba só contam com uma amostra cada, portanto, na figura o resultado está representado pelo triângulo.

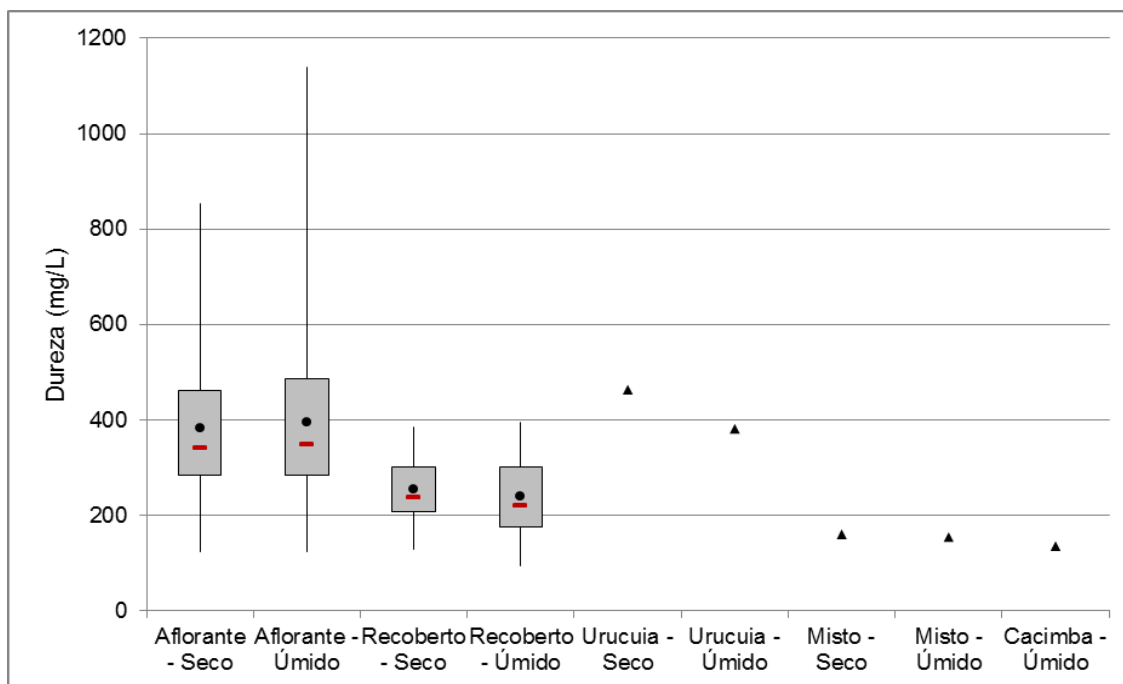


Figura 7.31: Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.

*A bola preta representa a média e a linha horizontal a mediana. A caixa cinza representa a amplitude interquartil e a linha vertical a amplitude interlimiar. Os poços no Urucuia, Misto e Cacimba só contam com uma amostra cada, portanto, na figura o resultado está representado pelo triângulo.

7.3.3 Fácies hidroquímicas

Nas Figura 7.32A e Figura 7.32B (período seco e período úmido, respectivamente) estão representados os diagramas de Piper (Piper, 1944) das amostras de água analisadas no âmbito do projeto. Diagramas de Piper possibilitam a classificação das águas e permitem comparar distintos grupos químicos. Observa-se um predomínio de águas bicarbonatadas cálcicas, seguidas de águas bicarbonatadas sódicas e sulfatadas cálcicas nos dois períodos de amostragem.

De maneira geral, nota-se que o conjunto de amostras do aquífero Bambuí recoberto apresenta fácies mais homogêneas, quando comparado às águas do aquífero Bambuí aflorante, concentrando-se totalmente no campo das águas bicarbonatadas cálcicas. No Bambuí aflorante observa-se certa dispersão das fácies, com algumas águas posicionadas no campo das sulfatadas cálcicas, a exemplo das amostras C-159, C-178 e C-180, e outras no campo das bicarbonatadas sódicas (C167, C-171, C-184 e C-190). Em comum, esses poços apresentam argilas calcíferas e níveis de calcários decompostos na porção superior do perfil litológico, provavelmente esse arcabouço esteja contribuindo no incremento de outros elementos às águas, além do bicarbonato e do cálcio proveniente da dissolução dos carbonatos. As águas com fácies sulfatada cálcica apresentam os maiores valores de STD do conjunto de poços do Bambuí aflorante. Não fica descartado o componente antrópico

influenciando no quimismo dessas águas, porém, não foram verificados outros indícios analíticos que corroborem com essa afirmação.

A amostra no aquífero Urucuia apresenta fácies bicarbonatada cálcica, e no diagrama de associação de Piper se posicionam no campo das águas do Bambuí com cobertura. Essa configuração evidencia a influência química local do aquífero Urucuia nas águas do aquífero Bambuí, isto é, a provável mistura de águas entre ambas as unidades. O poço Misto em ambos os períodos amostrais tem fácies bicarbonatadas cálcicas e no diagrama de associação de Piper se posicionam no campo de predomínio do aquífero Bambuí com cobertura.

Com relação às águas superficiais (nascente do rio João Rodrigues e da surgência do poço do Surubim), quimicamente há dificuldades de distinção entre essas águas e a dos poços amostrados. Ambas são bicarbonatadas cálcicas, com algum componente cloretado. A origem desses cloretos deve estar relacionada à circulação das águas na área.

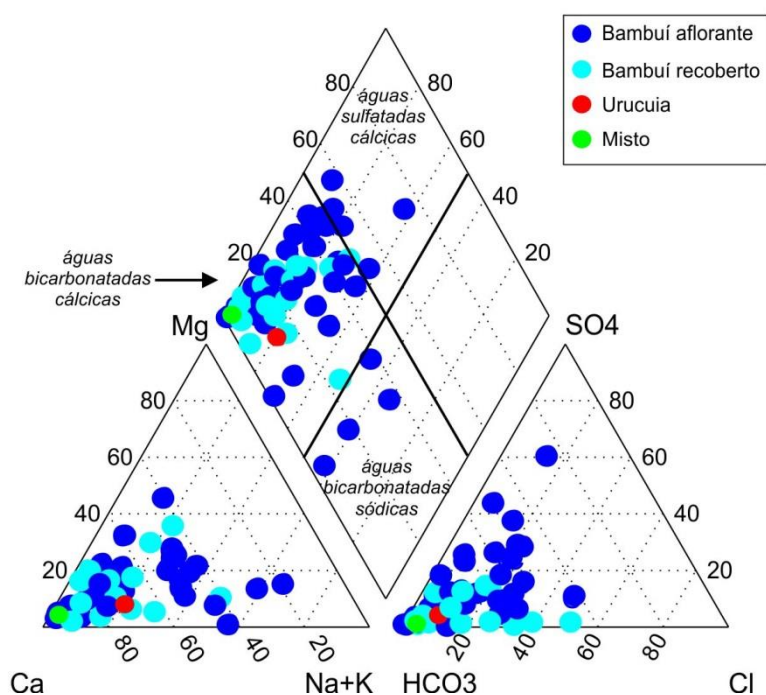


Figura 7.32 A: Diagrama de Piper das amostras coletadas no período úmido, na área regional de São Desidério

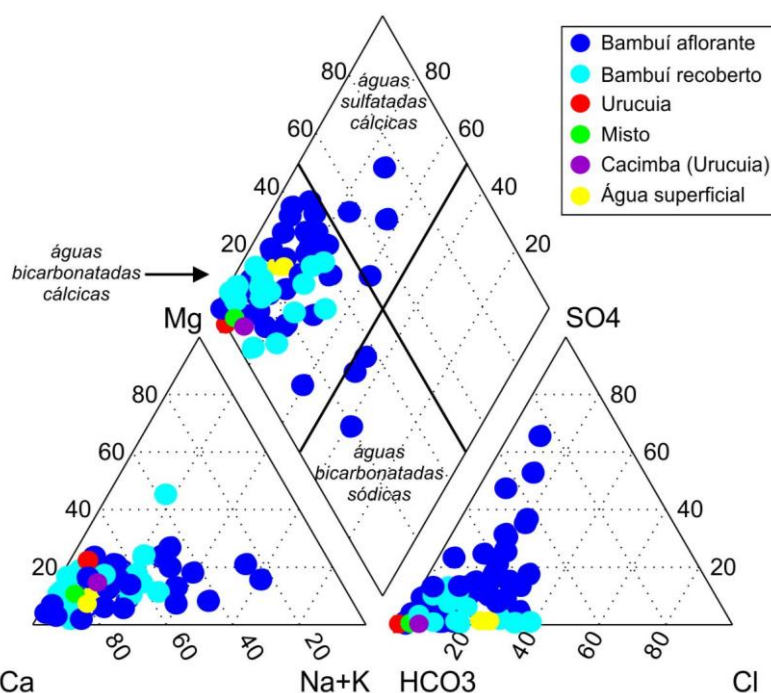


Figura 7.32 B: Diagrama de Piper das amostras coletadas no período úmido, na área regional de São Desidério

7.3.4 Parâmetros Específicos

7.3.4.1 Metais Pesados

Foram analisados os metais pesados arsênio, boro, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco, em pontos previamente selecionados no entorno de fontes potenciais de contaminação. Essa seleção foi realizada mediante a análise do mapa de uso de solo e cadastro de fontes de contaminação.

Na área regional de São Desidério foram selecionados sete coletas para metais pesados, cuja localização encontra-se na Tabela 7.15 e os resultados analíticos apresentados na Tabela 7.15. De acordo com os resultados, foram detectados apenas traços de boro, bário, cobre e zinco, com todos os valores abaixo do VMP da Portaria MS nº 2914 (2011), cuja presença deve estar ligada a fatores naturais. Para os demais parâmetros todos os resultados foram abaixo do limite de quantificação do método de análise.

Tabela 7.15 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L).

Amostra		Bambuú aflorante				Bambuú recoberto		
		C-155	C-182	C-189	C-190	C-145	C-146	C-149
Parâmetro	VMP ¹							
Arsênio	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Boro	-	< 0,001	0,014	< 0,001	0,002	0,002	< 0,001	0,003
Bário	0,7	0,087	0,141	0,081	0,033	0,106	0,149	0,086
Cádmio	0,005	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Chumbo	0,01	0,005	< 0,001	< 0,001	0,009	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cobre	2	0,003	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003
Cromo	0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Mercúrio	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Níquel	0,07	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Zinco	5	< 0,001	0,042	0,192	1,850	0,021	0,004	0,005

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria n° 2914/202.

7.3.4.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 10 amostras (5 poços e 5 superficiais) na área de São Desidério, conforme Tabela 7.16. Os pontos destinados às análises de agroquímicos estão localizados em áreas agrícolas potencialmente sob influência do uso de fertilizantes e pesticidas.

Foram avaliados 42 agroquímicos, elencados no item 7.1 do presente relatório. A seleção dos compostos analisados foi realizada mediante o cadastramento das principais culturas agrícolas existentes na área, e posterior levantamento em campo e em instituições, dos princípios agroquímicos empregados.

Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de detecção. A não detecção desses compostos pode denotar a sua inexistência ou a presença em quantidades muito reduzidas. Convém ressaltar, que no aquífero Bambuú predomina a circulação rápida das águas subterrâneas através de fraturas e condutos de dissolução, o que pode explicar a não detecção desses compostos no momento da coleta. Não fica descartada a possível permanência desses agroquímicos nas camadas superficiais do solo, que dificultam ou impedem a sua lixiviação até a zona saturada.

Tabela 7.16 – Pontos de coleta para determinação de agroquímicos.

Amostra	Município	Localidade
C-140	Catolândia	Lagoa do Simão
C-141	São Desidério	Ponte de Terra
C-151	São Desidério	Vereda
C-145	Baianópolis	Novato (Várzea)
C-154	Tabocas do Brejo Velho	Pedra de Fogo
CS-205	São Desidério	Sucupira (Nascente Rio João Rodrigues)
CS-206	São Desidério	Rio Grande
CS-207	Barreiras	Rio Cabeceira de Pedra
CS-208	São Desidério	Campo Grande (Rio São Desidério)
CS-209	São Desidério	Mutamba (Rio Mutamba)

7.3.4.3 Derivados de Petróleo

Na avaliação desses compostos foram selecionados poços para a investigação de eventuais ocorrências de contaminantes em áreas no entorno de postos de combustíveis e oficinas mecânicas.

Foram avaliados os parâmetros benzeno, etilbenzeno, tolueno, m,p-xilenos, o-xileno, xilenos e índice de fenóis. Para avaliação desses compostos foram analisadas sete amostras (Tabela 7.17). Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 7.17 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.

Amostra		Bambuú aflorante				Bambuú recoberto		
		C-155	C-182	C-189	C-190	C-145	C-146	C-149
Parâmetro	VMP ¹							
Benzeno (µg/L)	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Etilbenzeno (mg/L)	0,2	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Índice de Fenóis (mg/L)	-	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
m,p-Xilenos (µg/L)	-	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
o-Xileno (µg/L)	-	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Tolueno (mg/L)	0,17	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Xilenos (mg/L)	0,3	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003	< 0,003

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria nº 2914/2011

7.3.5 Qualidade das Águas para o Consumo Humano

Uma água pode ser considerada potável quando é passível de consumo humano sem perigo nenhum para sua saúde. A definição dos padrões de potabilidade é função dos órgãos sanitários de cada país, no entanto percebe-se uma tendência mundial de normalização das regulamentações existentes.

No Brasil, a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Os parâmetros considerados na referida Portaria e analisados no âmbito do estudo constam na Tabela 8.18 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 7.19 (substâncias organolépticas).

Tabela 7.18 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Substâncias Inorgânicas		
Arsênio	mg/L	0,01
Bário	mg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005
Chumbo	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
Fluoreto	mg/L F	1,5
Mercúrio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,07
Nitrato	mg/L N	10,0
Nitrito	mg/L N	1,0
Substâncias Orgânicas		
Benzeno	µg/L	5
Agrotóxicos		
Carbenzadim + Benomil	µg/L	120
Clorpirifós + Clorpirifós-Oxon	µg/L	30
Diurom	µg/L	90
Glifosato + Ampa	µg/L	500
Tebuconazol	µg/L	180

Tabela 7.19 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade, avaliadas no presente estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Amônia	mg/L NH ₃	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor aparente	uH	15
Dureza total	mg/L como CaCO ₃	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Sódio	mg/L	200
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000
Sulfato	mg/L	250
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	uT	5
Zinco	mg/L	5
Xilenos	mg/L	0,3

A avaliação dos resultados das análises químicas das amostras coletadas no âmbito do estudo em ambos os períodos amostrais, indicaram que os parâmetros STD, dureza, sódio, sulfato, cloreto, fluoreto, nitrato, ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras do aquífero Bambuí (Tabela 7.20). Para as demais unidades amostrais apenas o poço no Urucuia excedeu o VMP para o ferro no período úmido.

Tabela 7.20 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano.

Parâmetro	BambuÍ a florante (n=40)		BambuÍ recoberto (n=22)	
	Seco	Úmido	Seco	Úmido
STD	22,5% (9 amostras)	5% (2 amostras)	-	-
Dureza	20% (8 amostras)	20% (8 amostras)	-	-
Sódio	2,5% (1 amostra)	-	-	-
Sulfato	5% (2 amostras)	10% (4 amostras)	-	-
Cloreto	2,5% (1 amostra)	-	-	-
Fluoreto	5% (2 amostras)	2,5% (1 amostra)	-	-
Nitrato	2,5% (1 amostra)	-	4,5% (1 amostra)	4,5% (1 amostra)
Ferro	27,5% (11 amostra)	20% (8 amostras)	22,5% (5 amostras)	36% (8 amostras)
Manganês	10% (4 amostras)	7,5% (3 amostras)	22,5% (5 amostras)	13,5% (3 amostras)

7.3.6 Avaliações Isotópicas

As avaliações isotópicas foram realizadas por meio da caracterização dos isótopos ambientais de oxigênio e hidrogênio e radiogênico de estrôncio, em amostras de águas coletadas na rede de monitoramento qualitativo definida no presente estudo.

Foram coletadas 20 amostras de água, na segunda campanha (período úmido), e os resultados apresentados na Tabela 7.21.

Tabela 7.21 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de São Desidério.

Amostra	ID	Deutério	Oxigênio	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
		$\delta^2\text{H}$ (VSMOW) ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) ‰	
Bambuú aflorante	C-140	-21,9	-3,58	0,70783
Bambuú aflorante	C-156	-25,4	-4,09	0,70782
Bambuú aflorante	C-161	-39,1	-5,86	0,70781
Bambuú aflorante	C-167	-36,9	-5,59	0,70997
Bambuú aflorante	C-169	-13,9	-1,92	0,7086
Bambuú aflorante	C-193	-26,4	-3,98	0,70866
Bambuú aflorante	C-155	-25,7	-4,37	0,70826
Bambuú aflorante	C-158	-31,7	-4,91	0,70871
Bambuú aflorante	C-163	-24,2	-4,06	0,70823
Bambuú aflorante	C-178	-21,9	-3,57	0,70887
Bambuú aflorante	C-183	-28,3	-4,33	0,70799
Bambuú recoberto	C-146	-23,9	-3,79	0,70816
Bambuú recoberto	C-154	-23,5	-3,89	0,70798
Bambuú recoberto	C-191	-36,9	-5,59	0,70997
Bambuú recoberto	C-197	-34,5	-4,54	0,73082
Bambuú recoberto	C-201	-23	-3,54	0,70981
Urucuia	C-147	-26,7	-4,18	0,70886
Cacimba Urucuia	C-204	-8,8	-2,19	0,70849
Nascente do Rio João Rodrigues	CS-205	-20,7	-3,07	0,70807
Rio Grande	CS-206	-23,6	-3,71	0,71288

7.3.6.1 Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério ($\delta^2\text{H}$)

Os resultados foram plotados em gráficos $\delta\text{D}/\delta^{18}\text{O}$ juntamente com a reta meteórica mundial (GMWL ou RMM) a fim de se verificar a proveniência das águas amostradas (Figura 7.33).

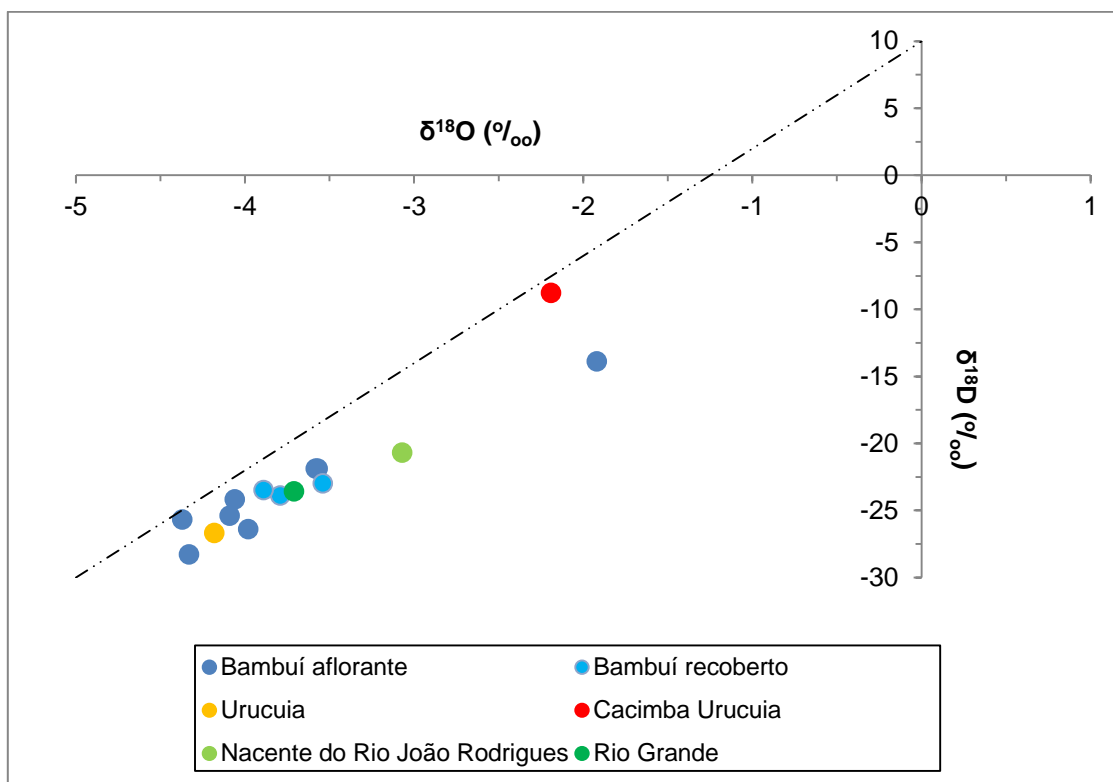


Figura 7.33: Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para o conjunto total de dados e por compartimento hidrogeológico. RMM=Reta Meteórica Global.

Todos os valores negativos indicam que as águas analisadas são empobrecidas em relação aos padrões VSMOW e sugere o “efeito da continentalidade” e o “efeito da quantidade”, citados por Gat (1971), que marcam as águas meteóricas, cuja composição isotópica depende de uma série de fatores.

O efeito da continentalidade descreve o decréscimo dos valores de δ na chuva quando a distância para o mar cresce. O processo tem início com a evaporação do Oceano Atlântico, cujos vapores são carregados pelos ventos predominantes de leste para oeste, e incorporados às massas úmidas que durante seu caminho perdem água e empobrecem em isótopos pesados.

Pelo efeito da quantidade, as chuvas intensas, como as ocorridas na área durante a amostragem, apresentam valores menores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , ou seja, ocorre um efeito inverso em relação ao volume de água precipitado. Durante a condensação, o vapor remanescente fica progressivamente empobrecido em isótopos pesados e, com ele, a água produzida com a condensação desse vapor.

Na Figura 7.33 observa-se que a maioria das amostras tem composição isotópica próxima à da linha meteórica mundial (RMM), confirmando sua

origem meteórica. Isso indica que as águas não sofreram evaporação significativa. Como o ^{18}O e o deutério são nuclídeos estáveis, os valores obtidos são representativos das águas de chuvas da época da recarga.

A amostra coletada na cacimba apresenta-se mais enriquecida em isótopos pesados (-2,19‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -8,8‰ para δD) quando comparada às demais amostras. Provavelmente isso se deve à evaporação da água da cacimba, dada a condição de nível estático bastante raso na época da amostragem.

As demais águas estão relativamente agrupadas entre os intervalos -5,86 e -3,07 para o $\delta^{18}\text{O}$ e entre -39,1 e -20,7 para δD , portanto, são águas menos enriquecidas quando comparadas às águas da cacimba.

A amostra do aquífero Urucuia apresenta baixa concentração de ^{18}O e deutério, fato que pode ser decorrente da infiltração direta e rápida das precipitações. As amostras dos poços no Bambuí (aflorante e com cobertura) e a amostra do Urucuia plotam no mesmo domínio do gráfico, indicando uma mistura de águas entre essas unidades aquíferas.

As amostras dos poços no Bambuí e a amostra superficial do Rio Grande plotam bastante próximas no gráfico, e com razões isotópicas médias de -3,89‰ para o $\delta^{18}\text{O}$ e -23,22‰ para o δD . Esse agrupamento provavelmente reflete a contribuição das águas do aquífero Bambuí nas águas superficiais do Rio Grande.

7.3.6.2 Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

A composição isotópica de estrôncio na água subterrânea é adquirida, inicialmente, na área de recarga, e posteriormente ao longo do caminho de fluxo por dissolução dos minerais e reações de troca iônica (Frost & Toner, 2004). A água adquire progressivamente a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das rochas com as quais interage. Diferenças nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ refletem diferenças na quantidade relativa de estrôncio derivada de diferentes minerais (Kendal & McDonnell, 1988).

Nas águas superficiais, a composição isotópica de estrôncio é primeiramente controlada pelas rochas que elas percorrem, por sua composição química e idade (Banner *et al.*, 2004). Já nas águas subterrâneas, a variação isotópica de estrôncio é semelhante das águas superficiais, refletindo idade e o tipo de rocha do aquífero, mas pode ser mais efetiva, já que a temperatura, pressão e forças iônicas são maiores em profundidade, além do que o tempo e a área de contato com a rocha, também, são maiores (Banner *et al.*, 2004), promovendo uma maior interação água-rocha. A água subterrânea adquire estrôncio durante a recarga e ao longo do fluxo hidráulico, conforme ela interage com os minerais presentes no aquífero (Gosselin *et al.*, 2004).

Dessa forma, McNutt (2000) aponta que como calcitas, aragonitas e dolomitas são mais solúveis que a maioria dos silicatos e apresentam altas concentrações de estrôncio, as águas subterrâneas fluindo através de aquíferos carbonáticos tendem a apresentar, mais rapidamente, altas concentrações de estrôncio e baixas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, enquanto que em águas subterrâneas fluindo através de aquíferos silicáticos tendem a apresentar altas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e baixas concentrações de estrôncio

A razão de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das águas do Bambuí aflorante variou de 0,70781 (C-161) a 0,70997 (C-191), enquanto no mesmo aquífero, com cobertura as razões variaram de 0,70798 (C-154) a 0,73082 (C-197). Nas amostras de água do Urucuia as razões foram de 0,70886 para o poço e 0,70849 (C-147) para a cacimba (C-204). Nota-se, portanto, uma consistência entre águas, com um leve crescimento das razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para as águas do Bambuí com cobertura, notadamente o poço (C-197), localizado no município de Bom Jesus da Lapa, que apresenta 24 metros de espessura Urucuia.

É importante observar que o poço C-191, no município de São Felix do Coribe, no seu perfil construtivo não está definido a litologia da cobertura. Tratou-se, aqui, como Bambuí aflorante pelo valor do STD e da pouca cobertura. Entretanto, sua razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,70997 é a mais elevada dentre as razões dos poços definidos como Bambuí aflorante. Mostrando, assim uma possível contribuição do Urucuia.

Em relação às águas representativas do Urucuia (poço e cacimba) as razões mostram, provavelmente, misturas de águas com o Bambuí. Essa característica já tinha sido observada no item referente à avaliação hidroquímica das águas, especialmente no período seco, em que a água do poço no Urucuia se assemelha à água do aquífero Bambuí. Ressalta-se que devido às suas características mineralógicas essencialmente silicáticas, deveriam mostrar razões mais elevadas, conforme relatado por McNutt (2000).

Para as águas superficiais, observa-se que a água da nascente do Rio João Rodrigues (CS-205) tem razão isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,70807 similar à dos poços do aquífero Bambuí aflorante. As águas do Rio Grande têm uma razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,71288 (CS- 206), sendo juntamente com o poço (C- 197) do Bambuí recoberto o que mostram mais radiogênicos, ou seja, recebem, certamente, em suas águas contribuições do aquífero Urucuia.

7.4 Hidrogeoquímica da Subárea Regional 3 - Montes Claros

A Subárea regional 3 é mostrada na Figura 7.34. Corresponde à porção sul do Carste São Francisco, estando contida no estado de Minas Gerais. Envolve essencialmente litologias fissuro-cársticas do Grupo Bambuí. As litologias puramente cársticas deste grupo ocorrem muito restritamente e de forma localizada. Nesta subárea destaca-se a região de Montes Claros como a mais importante do ponto de vista econômico e de exploração de água subterrânea.

Na avaliação hidrogeoquímica das águas subterrâneas da área regional de Montes Claros, as características geológicas obtidas dos perfis litológicos e construtivos dos poços amostrados, não mostram diversidades litológicas que permitissem separar as amostras por grupos.

Regionalmente, nota-se que, em determinadas áreas, o Grupo Bambuí pode apresentar expressiva cobertura arenítica (representada pelo Urucuia e/ou Areado), em detrimento de outras onde o calcário ocorre exposto na superfície. Convém ressaltar, que a grande maioria dos poços está contextualizada geologicamente no Grupo Bambuí, a única exceção é o poço C-111 que capta águas unicamente dos arenitos supracitados que localmente recobrem os calcários do Bambuí.

Em algumas situações esses arenitos são captados juntamente com o Bambuí, na medida em que os poços possuem seções abertas (filtros, no caso dos arenitos) em ambas as unidades, tratando-se, portanto de poços mistos. Esse é o caso de 8 poços: C-085, C-086, C-087, C-091, C-101, C-104, C-118 e C-121. Para a avaliação estatística optou-se pelos poços mistos conjuntamente aos poços do Bambuí, haja vista o número considerável de poços sem perfil litológico e, ainda, alguns contando com os perfis, bastante confusos e duvidosos na sua descrição.

Acrescenta-se que para as águas dos poços C-101 (poço misto) e C-111 (poço no arenito) foram realizadas determinações isotópicas, recurso importante para se verificar a consistência das descrições litológicas dos perfis.

A Figura 7.34 mostra a distribuição dos poços e das amostras de água superficiais na área regional de Montes Claros. Ressalta-se que no período seco foram coletadas duas amostras de água superficiais: na surgência do Rebentão dos Ferros (CS-56) e na surgência do Riachão (CS-58). No período úmido foram acrescentadas mais cinco amostras de águas superficiais: a gruta do Jamelão (CS-211), a lagoa de Pedra (CS-212), o rio Verde Grande (CS-213), a surgência do Mocambo (CS-214), a surgência da Caucaia (CS-215) e a surgência da Gordura (CS-216).

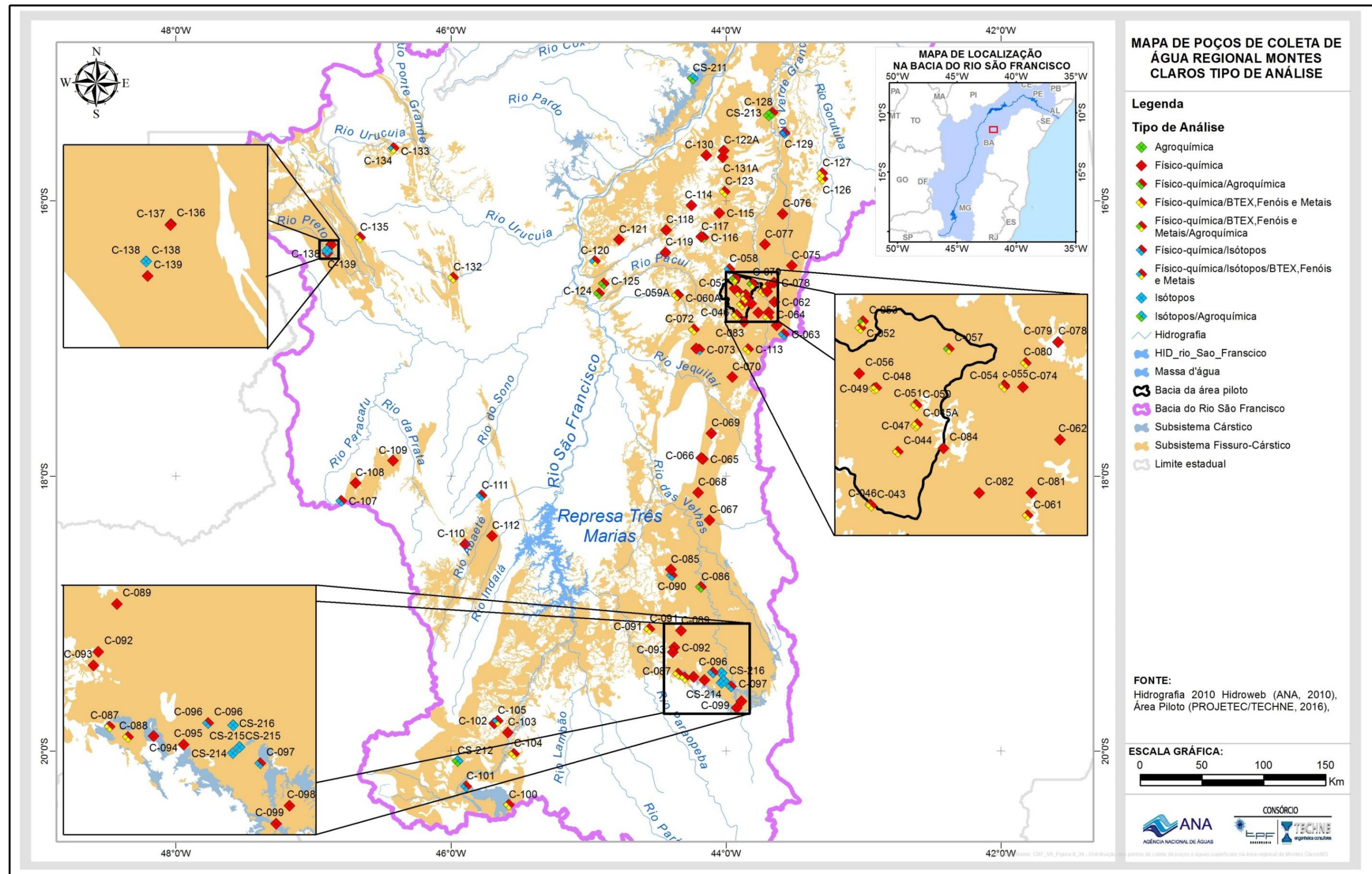


Figura 7.34: Distribuição dos pontos de coleta de poços e águas superficiais na área regional de Montes Claros/MG.

7.4.1 Caracterização das Águas

As Tabelas Tabela 7.22 e Tabela 7.23 mostram os sumários estatísticos dos dois períodos de coletas.

Tabela 7.22 – Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período seco (n=94).

	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
pH in situ	6,41	8,20	7,16	7,07	0,35	4,89	1,79
T (°C) in situ	19,20	29,00	25,57	25,40	1,56	6,10	9,80
ORP (mV) in situ	-167,40	384,60	111,17	152,20	107,41	96,61	552,00
CE (µS/cm) in situ	15,00	1421,00	494,33	480,00	272,55	55,14	1406,00
STD (mg/L)	13,00	1325,00	346,31	300,00	222,81	64,34	1312,00
Dureza (mg/L)	0,30	607,00	183,75	179,00	110,55	60,17	606,70
Cálcio (mg/L)	0,08	202,00	60,61	65,00	37,27	61,49	201,92
Magnésio (mg/L)	0,02	37,60	7,85	6,72	6,60	84,03	37,58
Sódio (mg/L)	0,11	98,60	17,42	11,00	19,71	113,14	98,49
Potássio (mg/L)	0,07	8,11	1,71	1,32	1,42	83,21	8,04
Bicarbonato (mg/L)	2,50	399,00	211,02	227,00	95,15	45,09	396,50
Sulfato (mg/L)	0,25	463,00	23,27	4,63	64,35	276,57	462,75
Cloreto (mg/L)	0,25	243,00	13,95	2,27	31,55	226,09	242,75
Fluoreto (mg/L)	0,03	0,64	0,15	0,11	0,14	99,46	0,61
Fosfato (mg/L P)	-	-	-	-	-	-	-
Nitrato (mg/L N)	0,15	36,20	1,32	0,15	4,03	305,33	36,05
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,10	0,01	0,01	0,01	94,21	0,09
Amônia (mg/L NH3)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Ferro (mg/L)	0,01	29,00	1,07	0,07	3,58	333,69	28,99
Manganês (mg/L)	0,001	1,60	0,12	0,01	0,25	207,11	1,60

Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

Tabela 7.23 - Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período úmido (n=93).

	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV (%)	Amplitude
pH in situ	6,57	8,21	7,33	7,31	0,34	4,69	1,64
T (°C) in situ	20,30	28,10	24,90	25,00	1,30	5,21	7,80
ORP (mV) in situ	-138,00	466,20	121,79	146,70	95,46	78,38	604,20
CE (µS/cm) in situ	20,00	1481,00	495,43	500,50	250,47	50,56	1461,00
STD (mg/L)	19,00	1064,00	311,16	298,50	183,76	59,06	1045,00
Dureza (mg/L)	5,12	575,00	184,49	171,50	104,51	56,65	569,88
Cálcio (mg/L)	1,38	161,00	61,77	60,90	35,92	58,14	159,62
Magnésio (mg/L)	0,33	42,00	7,31	5,71	6,44	88,06	41,67
Sódio (mg/L)	0,23	114,00	15,97	11,55	18,20	114,01	113,77
Potássio (mg/L)	0,14	9,09	1,84	1,38	1,49	80,82	8,95
Bicarbonato (mg/L)	12,70	464,00	211,11	212,00	88,69	42,01	451,30
Sulfato (mg/L)	0,25	453,00	19,36	3,80	54,81	283,09	452,75
Cloreto (mg/L)	0,25	287,00	14,74	3,41	34,67	235,22	286,75
Fluoreto (mg/L)	0,03	0,74	0,20	0,14	0,17	86,66	0,72
Fosfato (mg/L P)	0,01	2,10	0,07	0,03	0,25	346,18	2,10
Nitrato (mg/L N)	0,25	17,70	1,45	0,25	2,95	203,56	17,45
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	62,68	0,04
Amônia (mg/L NH3)	0,05	2,82	0,10	0,05	0,30	291,22	2,77
Ferro (mg/L)	0,001	7,27	0,62	0,08	1,33	214,32	7,27
Manganês (mg/L)	0,001	1,34	0,09	0,01	0,22	244,76	1,34

Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coeficiente de Variação

Na área de estudo, no período seco, os valores de STD obtidos nas 94 amostras de água subterrânea apresentam uma média de 346,31 mg/L, variando entre o mínimo de 13,00 (C-106), no município de Presidente Olegário e o máximo de 1325,00 mg/L (C-128), no município Jaíba (Tabela 7.22 e Figura 7.34 e Figura 7.35).

A Figura 7.35 mostra a distribuição de STD na área. Nota-se uma quantidade representativa de valores abaixo de 200 mg/L distribuídos, principalmente, na porção oeste e sul da área de estudo, com destaque para dois poços (C-102 e C-106) identificados com teores abaixo de 25 mg/L, localizados no extremo sul da área.

Os valores entre 200 a 600 mg/L, também apresentam distribuições significativas na área, em especial na faixa leste da área. Já os valores mais

elevados, acima de 800 mg/L, estão presentes em menor número e concentram, principalmente, na porção nordeste, inclusive o poço com maior teor de STD (C-128), localizado no extremo norte da área.

No período úmido, os teores de STD mostram um leve declínio com média de 311,16 mg/L, com valor mínimo de 19,00 mg/L (C-134), no município de Burutis e máximo de 1064,00 mg/L (C-128), no município de Jaíba.

A Figura 7.36 mostra a distribuição de STD na área, no período úmido. Nota-se que os valores mais elevados estão na porção nordeste, e que os menores valores predominam nos demais setores da área, seguindo, portanto, o mesmo padrão de distribuição de STD do período seco. Os valores mais baixos de STD (< 200 mg/L) estão localizados nas porções sudoeste, noroeste e central sul da área. O comportamento, relativamente, homogêneo de STD reforça a hipótese de que a porção nordeste da área registra certa particularidade em relação às demais.

Geograficamente, os valores elevados de STD, correspondem aos domínios onde a Serra da Jaíba se destaca com afloramentos de rochas calcárias mais puras. Por outro lado, os valores mais baixos (menores do que 200 mg/L) e intermediários (entre 200 a 400 mg/L), predominantes na área, estão relacionados, possivelmente, à influência de rochas siliciclásticas de natureza quartzosa que recobrem o Bambuí, de ocorrência expressiva na porções noroeste, sudoeste e central sul da área (Figura 7.35 e Figura 7.36).

As observações levantadas para o comportamento de STD na área podem ser ilustradas também no gráfico de distribuição de frequência para os dois períodos de amostragem. Nota-se um predomínio de amostras com STD nos intervalos menor que 200 mg/L e entre 200 a 400 mg/L. Onze amostras se destacam na curva no intervalo maiores do 600 mg/L (Figura 7.37 e Figura 7.38).

Os diagramas de dispersão (Figura 7.39 a Figura 7.42) indicam não existir diferenças nos comportamentos das correlações entre os pares de variáveis nos períodos seco e úmido. Os referidos gráficos mostram que as correlações positivas mais consistentes ocorrem entre o STD e dureza e o STD e cálcio, com nítidos e consistentes alinhamentos de pontos (Figura 7.39 e Figura 7.40). Os diagramas STD e magnésio e o STD e sódio indicam, também, consistentes correlações positivas, mas mostram uma maior dispersão de alguns pontos (Figura 7.41 e Figura 7.42).

As águas subterrâneas na área são classificadas quanto à quantidade de STD, por unidade de volume de água, como predominantemente doces, com alguns casos localizados de amostras de águas ligeiramente salobras (C-62, C-75 e C-128 no período seco e C-128 no período úmido), conforme a classificação de McNeely et. al. (1979).

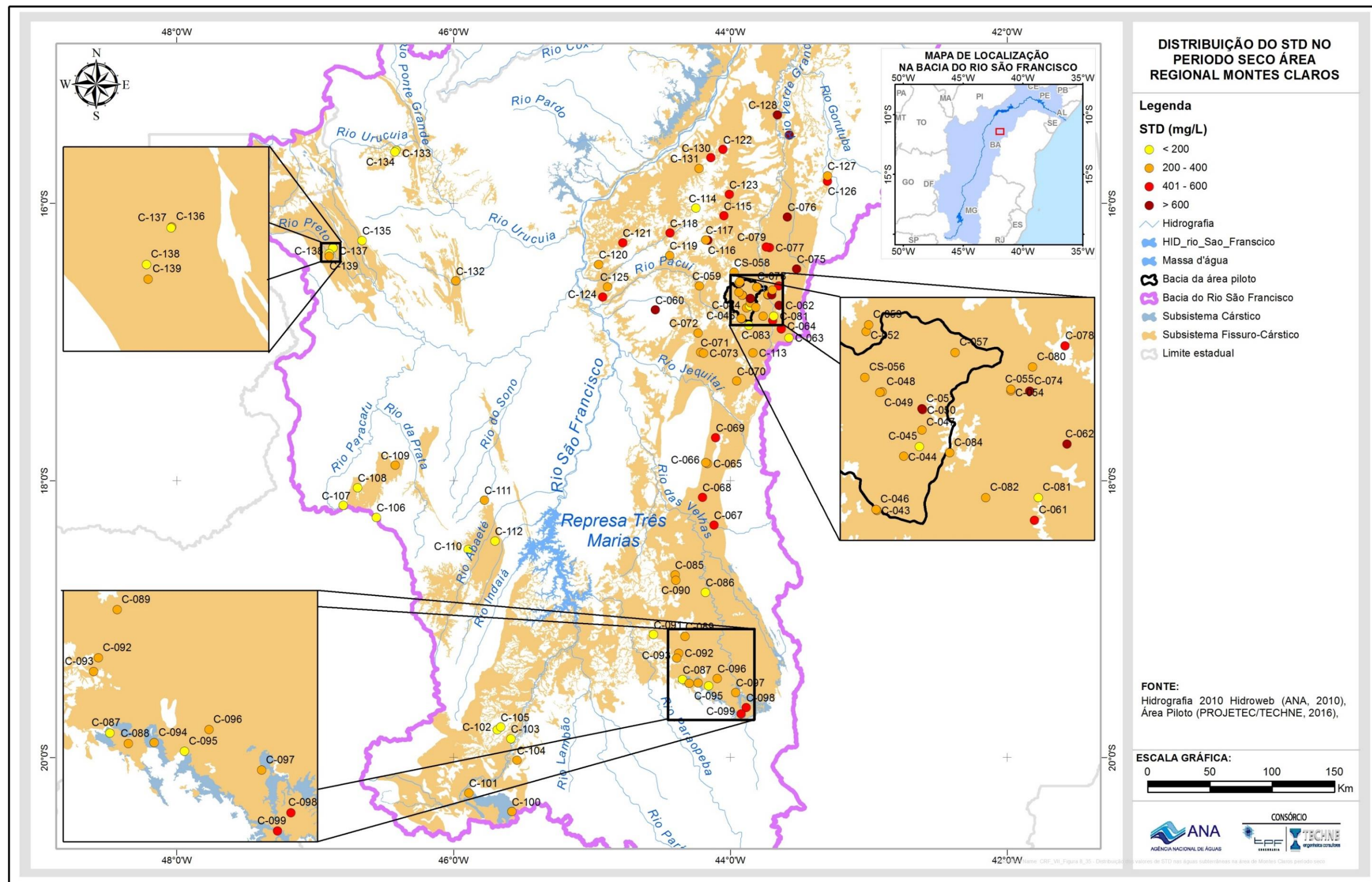


Figura 7.35: Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

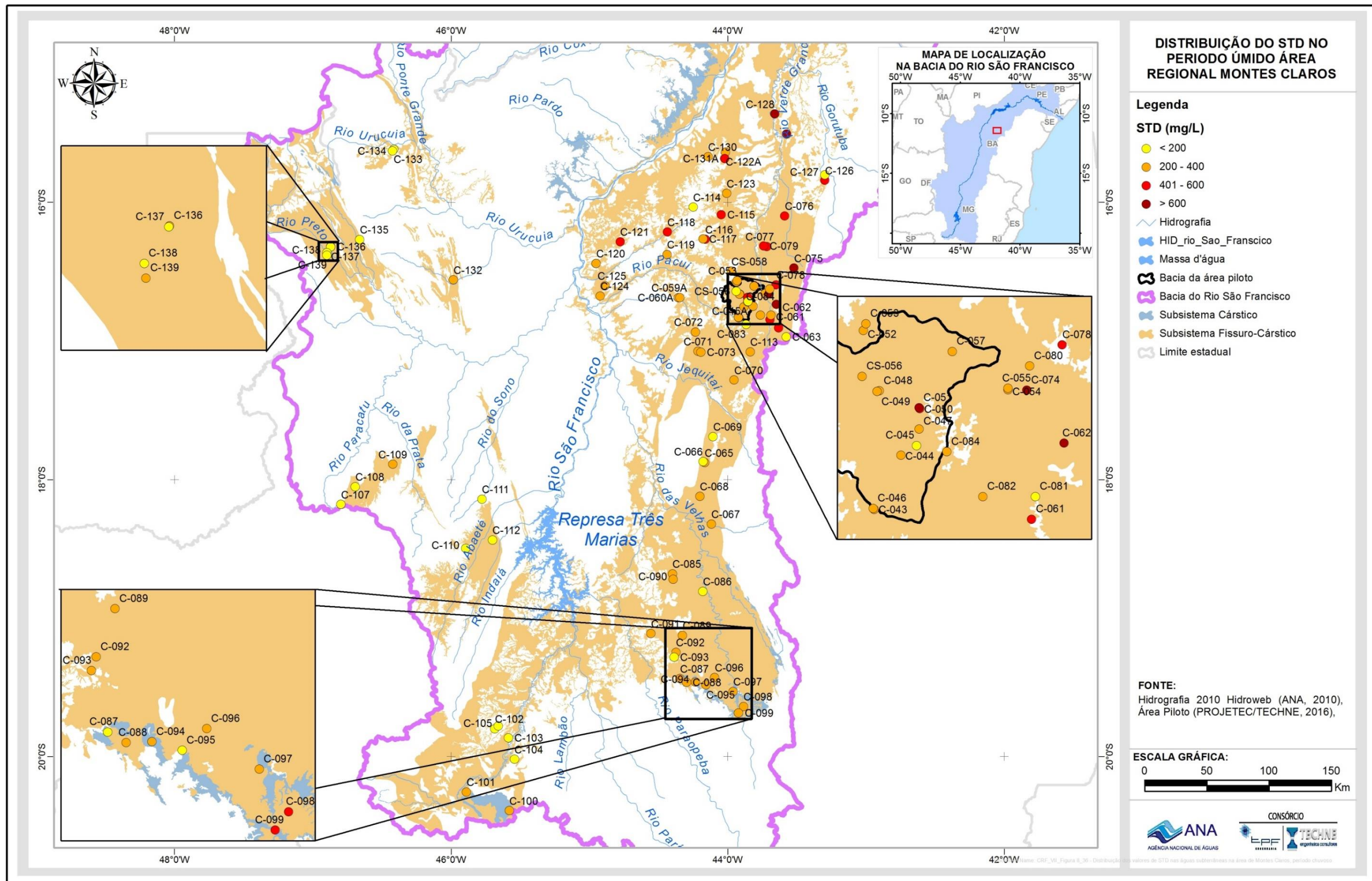


Figura 7.36: Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período chuvoso.

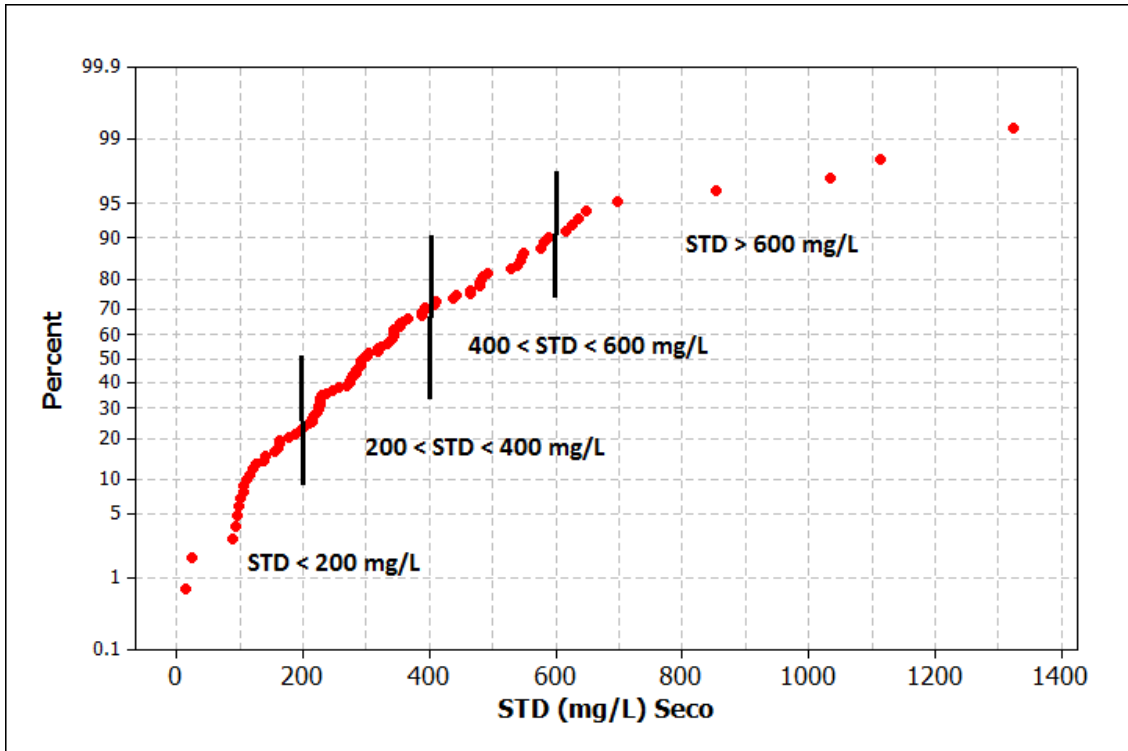


Figura 7.37: Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período seco.

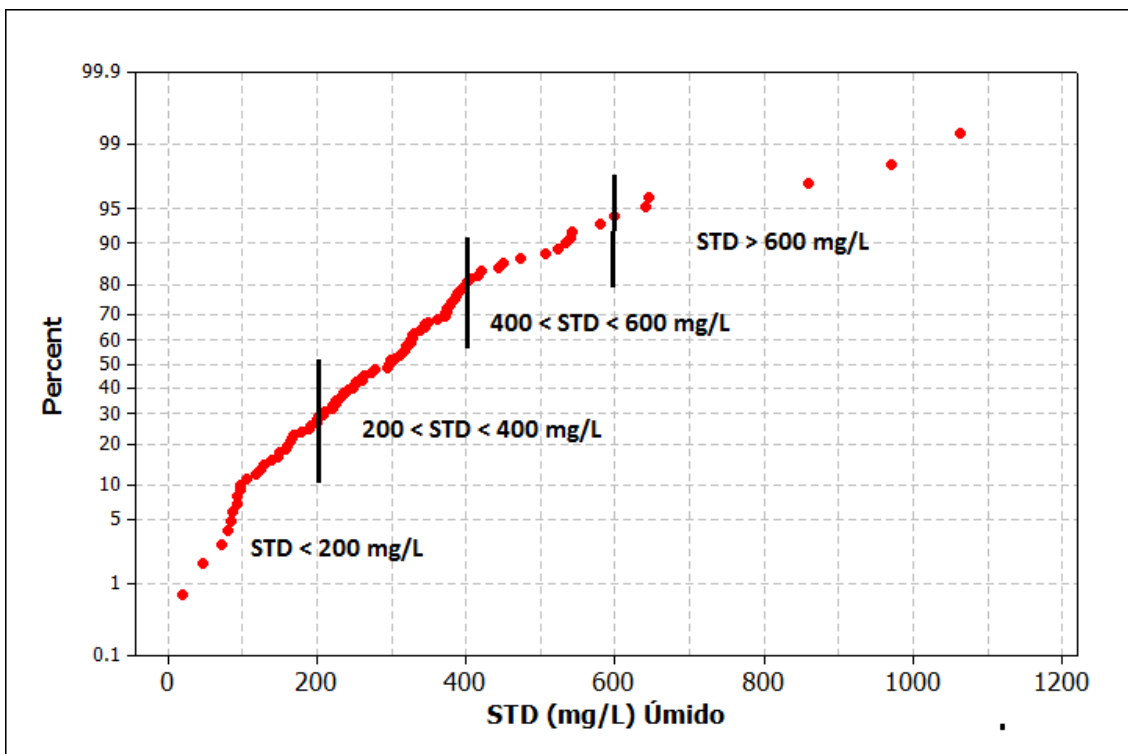


Figura 7.38: Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período úmido.

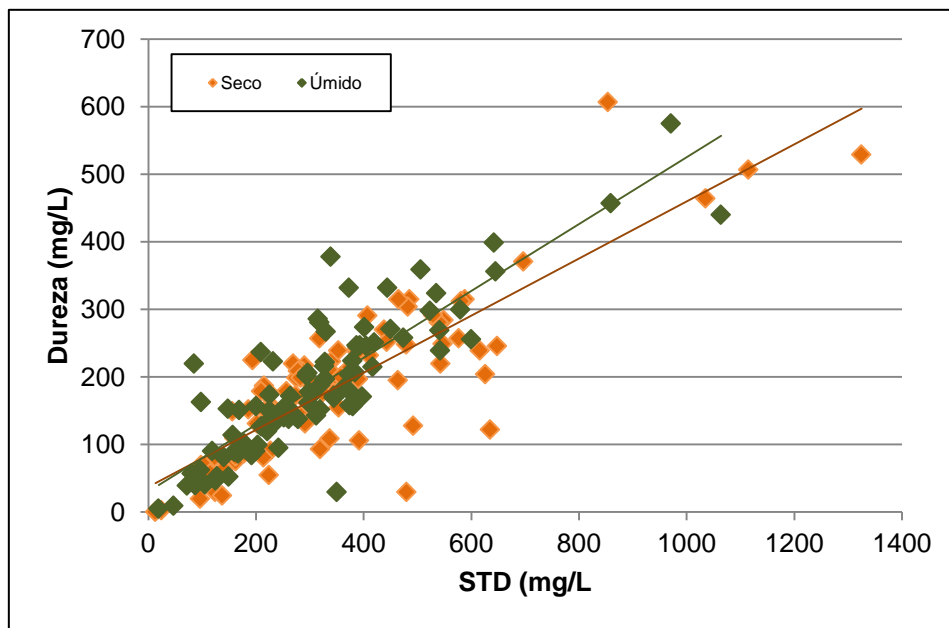


Figura 7.39: - Correlação entre STD e dureza em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

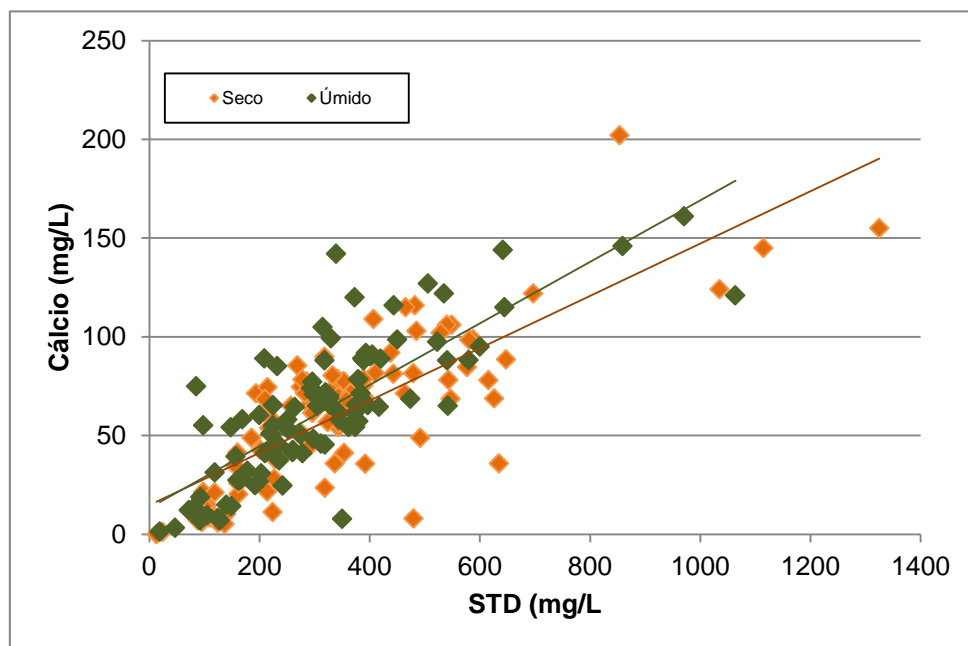


Figura 7.40: Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

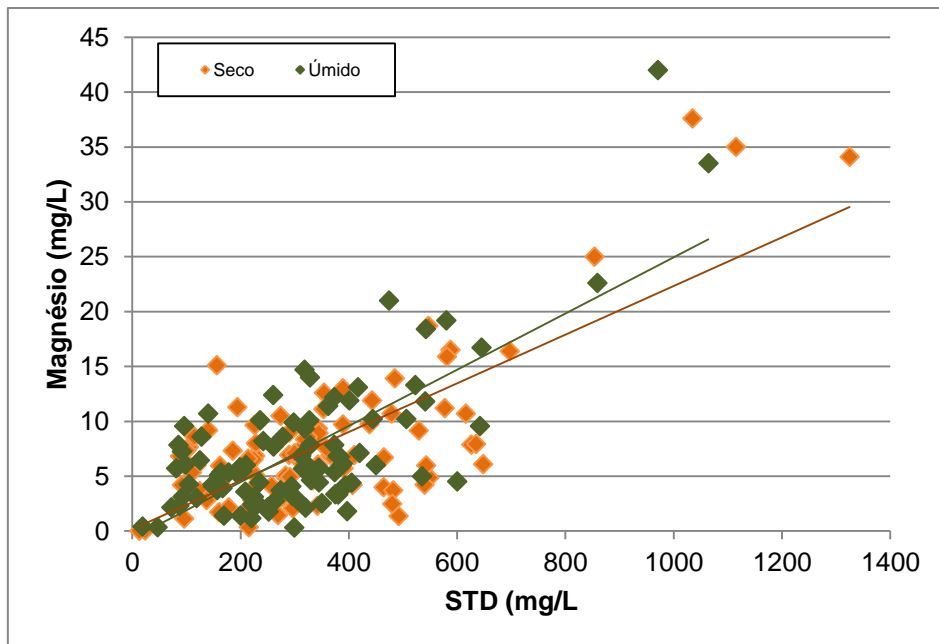


Figura 7.41: Correlação entre STD e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

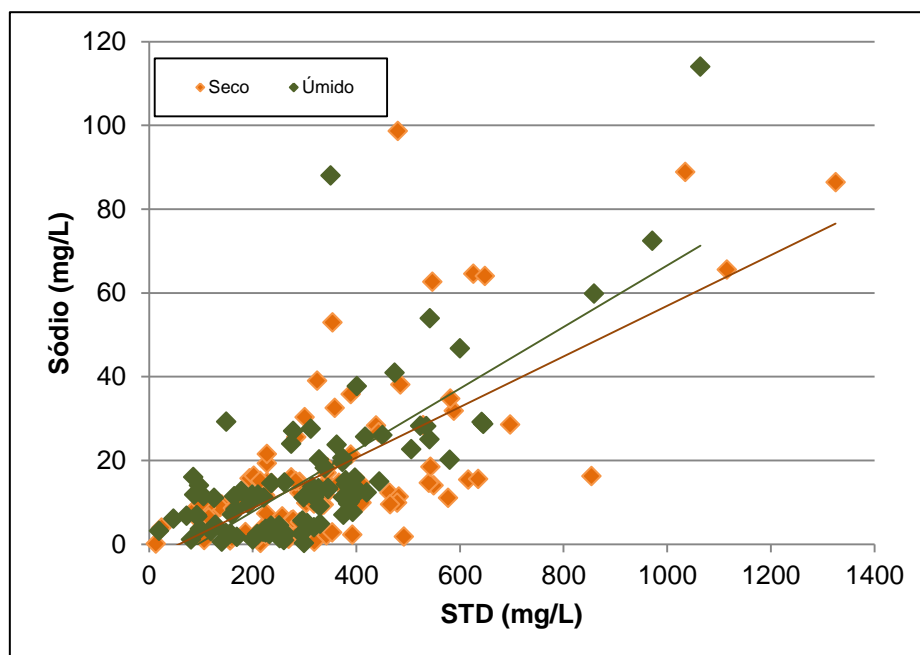


Figura 7.42: Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

A Tabela 7.22 mostra a variação dos valores de pH medidos *in situ* nas amostras de água coletadas no período seco. Nota-se que as águas apresentam valores de pH oscilando entre 6,41 (C-041, C-079) a 8,2 (C-124), com média de 7,16. No período úmido (Tabela 7.23) os valores de pH mostram valores um pouco mais elevados, variando entre 6,57 (C-132) a 8,21 (C-124), com média de 7,33. No geral as amostras de águas variam de pouco ácidas a levemente alcalinas, havendo predominância de águas com caráter neutro a levemente alcalino, nos dois períodos sazonais.

Em relação aos constituintes secundários, os teores de nitrato obtidos nas amostras de águas subterrâneas da região de Montes Claros, nos dois períodos sazonais, apresentam um predomínio de valores baixos, inclusive com um número expressivo de amostras com resultados próximos ou no limite de quantificação do método de análise (0,15mg/L). No período seco, entretanto, amostras isoladas (C-116 e C-118) localizadas na parte norte da área, nos municípios de Mirabela e Brasília de Minas, respectivamente, registram teores elevados, atingindo 36,2 mg/L no poço C-116 (Figura 7.34).

O período úmido segue a mesma tendência do período seco, ou seja, predomínio de amostras com teores de nitrato muito baixos e/ou próximo ao limite de detecção do método analítico (0,25 mg/L). As amostras C-116 e C-118 permaneceram com teores acima de 10 mg/L de nitrato, sendo que na amostra C-116 o teor de nitrato no período úmido atingiu um valor de 17,7 mg/L, ocorrendo, portanto, uma diluição. Possivelmente, as elevações dos teores de nitrato nas águas desses poços estão condicionadas à contaminação antrópica (efluentes domésticos, principalmente). Os teores de cloreto desses poços, já discutidos anteriormente, corroboram para essa explicação.

O fluoreto é outro constituinte secundário importante nas águas subterrâneas. A ingestão de água com teores de fluoreto acima de 1,5 mg/L está associada à fluorose dentária. A fluorose dentária é caracterizada como um distúrbio no desenvolvimento dos dentes causado pela presença excessiva e/ou crônica de fluoreto durante o período formativo do dente (Pires, 2001).

Nos poços selecionados neste estudo, para a região de Montes Claros, os teores de fluoreto foram predominante baixos, com média de 0,15 mg/L e 0,20 mg/L, respectivamente, para o período seco e úmido (Tabela 7.22 e Tabela 7.23). Saliencia-se que, apesar dos todos os poços amostrados nesse estudo apresentarem teores baixos de fluoreto, estudos específicos de detalhe, objetivando identificar e entender a presença de fluoreto nas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, reportam ocorrências expressivas desse íon, principalmente nos municípios de Jaíba, Verdelândia, Varzelândia e São Francisco (Velásquez *et al.* 2003, 2007 e 2009; Costa, 2011 e Silva *et al.*, 2011, dentre outros).

O ferro é outro elemento secundário que se destaca nas águas subterrâneas na região de Montes Claros. Nota-se que existe predomínio de amostras com teores acima 0,3 mg/L, atingindo um máximo de 29,0 mg/L, no poço C-102, no município de Luz, na porção sul da área (Figura 7.34). Na primeira campanha,

representando o período seco, o ferro variou de 0,01 (C-057, C-080, C-083, C-085, C-092, C-101 e C-126) a 29,0 mg/L (C-102), com média de 1,01 mg/L (Tabela 7.22). Na segunda campanha, realizada no período úmido, as variações foram de 0,001 (C-097) a 7,27 mg/L (C-127), com média de 1,73 mg/L (Tabela 7.23).

Para compreender o controle da ocorrência do ferro nessas águas foram confeccionados diagramas de correlações do ferro com o pH (Figura 7.43) e Eh (Figura 7.44), para os dois períodos de amostragem. Observa-se que a grande maioria das amostras que apresentam valores acima de 0,3 mg/L de ferro se distribuem, principalmente, na faixa de pH entre 6,6 a 8,2. As amostras com teores acima de 5 mg/L (C-048, C-102, C-115, C-119, C-127, C-127), inclusive com um teor de 29 mg/L (C-102) e outro de 15,60 mg/L (C-127), se distribuem na faixa de pH entre 6,6 a 7,6. Esses dados mostram, portanto, que a faixa de pH entre 6,6 a 7,6 é mais favorável aos teores elevados de ferro.

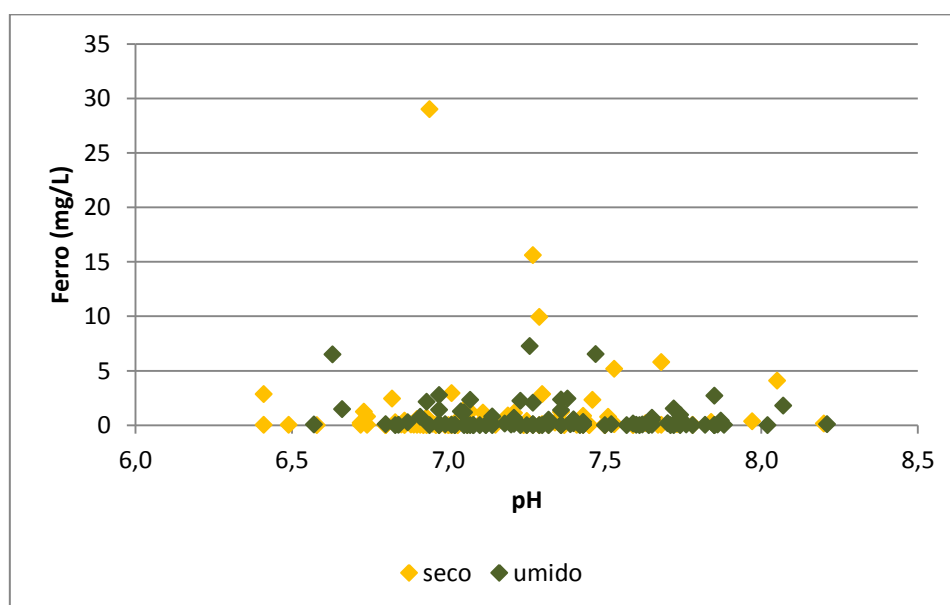


Figura 7.43: Correlação entre ferro e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

A Figura 7.44 mostra o diagrama de correlação entre o ferro e o Eh (potencial de oxi-redução). Observa-se que os três maiores resultados do ferro, todas no período seco, ocorrem em ambiente redutor, ou seja, com Eh negativo no intervalo de -10,20 a -83,60 mv. Pode ocorrer então, uma influência localizada envolvendo Eh negativo, período seco e elevação dos teores de ferro. Entretanto essa correspondência pode ser aleatória, já que existe, também, grande número de amostras com baixos teores de ferro e com Eh negativo, inclusive do período seco.

A origem desse elemento, no qual o pH e Eh atuam como fatores determinantes para a sua ocorrência, pode estar ligada à corrosão do revestimento dos poços, além da proveniência litológica, já que alguns minerais carbonáticos têm ferro em sua composição.

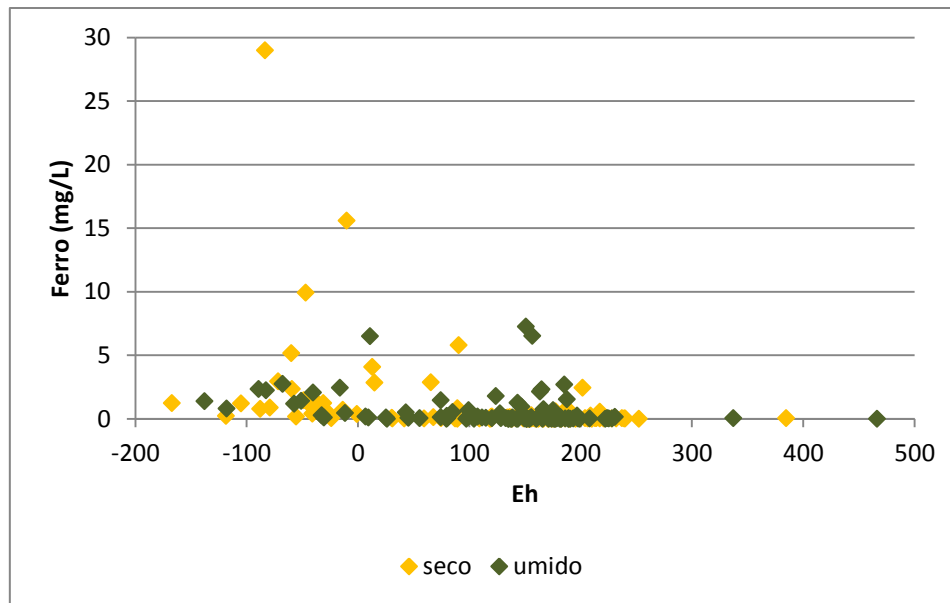


Figura 7.44: Correlação entre ferro e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

O manganês se assemelha quimicamente ao ferro no modo de ocorrência nas águas naturais. É menos abundante que o ferro e por consequência, sua presença na água é menos comum e a sua concentração, em geral, é muito menor que a do ferro (Hem, 1985). Nas águas subterrâneas de Montes Claros evidenciaram teores predominantemente baixos (Tabela 7.22 e Tabela 7.23). Alguns poços, entretanto, mostram teores acima de 0,1 mg/L, que é o valor máximo permitido para as águas de consumo humano. Nos poços C-50, C-109 e C-127, localizados respectivamente nos municípios Montes Claros, Lagoa Grande e Nova Porteirinha, foram registrados teores um pouco acima de 1,0 mg/L.

Para entender os fatores controlados do manganês nessas águas, foram montados diagramas de correlação entre o manganês e o pH (Figura 7.45) e o Eh (Figura 7.46). Na Figura 7.45 percebe-se um domínio de valores baixos para o manganês, predominantemente inferiores a 0,1 mg/L, e concentrados na faixa de pH entre 6,4 a 8,2. Enquanto que os teores de manganês acima de 1,0 mg/L, ocorre na faixa de pH entre 6,9 a 7,3.

A Figura 7.46 mostra o diagrama do manganês com Eh. Nota-se que sete amostras com teores de manganês acima de 0,8 mg/L ocorrem na faixa de Eh negativo, ou seja, em ambiente redutor e também na faixa de Eh positivo (ambiente oxidante), tanto nas amostras no período seco quanto nas amostras no período úmido. Não parece, portanto, existir uma relação direta entre esses dois parâmetros. As concentrações de manganês parecem não ser influenciadas pela sazonalidade do clima, e nem controladas pelos parâmetros Eh e pH do meio. A origem do manganês nas águas estudadas, particularmente nos poços C-050, C-109 e C-127, ainda não são conclusivas nesse estudo.

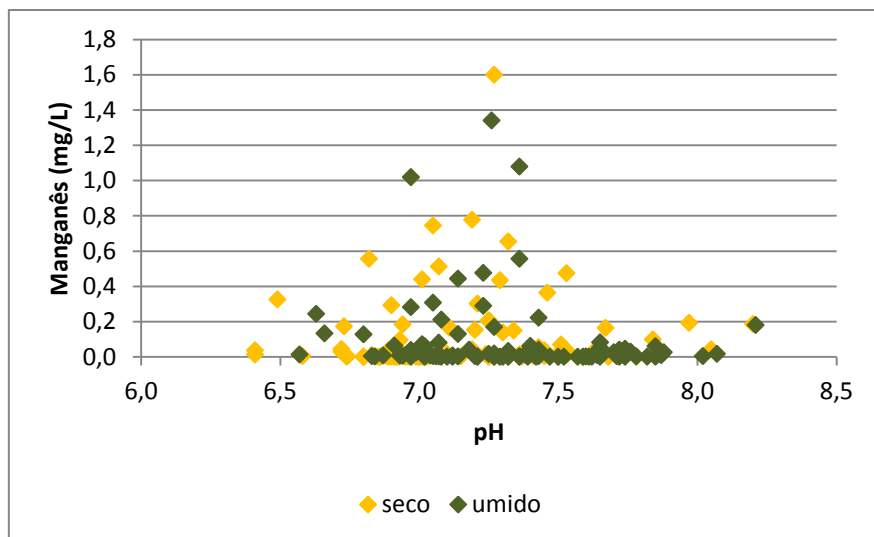


Figura 7.45: Correlação entre manganês e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

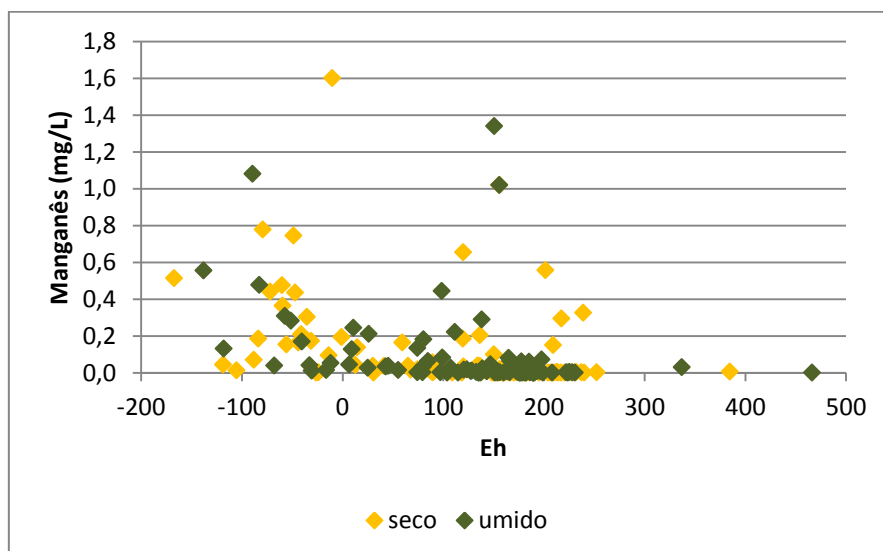


Figura 7.46: Correlação entre manganês e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros

Para a dureza das águas subterrâneas de Montes Claros, os resultados, estão apresentados na Tabela 7.22 e Tabela 7.23, nos períodos seco e úmido, respectivamente. No período seco, os teores da dureza variaram de 0,30 (C-106) a 607,0 mg/L (C-060), com média 183,75 mg/L e mediana de 179,09 mg/L. Para o período úmido, os valores da dureza variaram entre um mínimo de 5,12 (C-134) mg/L e um máximo de 575,0 mg/L (C-062), com média de 184,49 mg/L e mediana de 171,50 mg/L.

Os mapas de distribuição da dureza na região de Montes Claros, para os dois períodos sazonais, foram confeccionados com base em três intervalos: águas com dureza menor do que 200 mg/L, águas com intervalo da dureza entre 200 a 400 mg/L e água com dureza acima de 400 mg/L (Figura 7.47 e Figura 7.48). Evidencia-se nos dois períodos um predomínio de amostras com teores da

dureza menores que 200 mg/L, principalmente nas porções sul, sudeste, sudoeste e noroeste da área. Os maiores teores da dureza (acima de 400 mg/L) e os teores intermediários (intervalo entre 200 a 400 mg/L) estão concentrados na parte norte/nordeste e leste da área. No geral, a tendência de distribuição da dureza apresenta muita similaridade nas duas campanhas de amostragem.

É importante destacar que os principais responsáveis pela dureza dessas águas são cálcio (Figura 7.49), bicarbonato (Figura 7.50) e subordinadamente o magnésio (Figura 7.51), muito frequentes em ambiente cársticos, com ocorrência em toda área. Na parte norte e nordeste da área, a litologia calcária parece ocorrer de forma mais homogênea e maciça, sem influência significativa de litologias siliciclásticas.

De acordo a classificação de Custódio & Llamas, 2001, essas águas se enquadram, predominantemente, como duras a muito duras. Esses tipos de águas estão concentrados, principalmente, nas porções norte e leste da área. Subordinadamente ocorrem águas brandas (C-102, C-105, C-106, C-108, C-110, C-112, C-124, C-133, C-134 e C-134) e pouco duras (C-063, C-083, C-086, C-091, C-093, C-103, C-107, C-135, C-136, C-138 e C-139) nas porções sul, sudeste e noroeste da área.

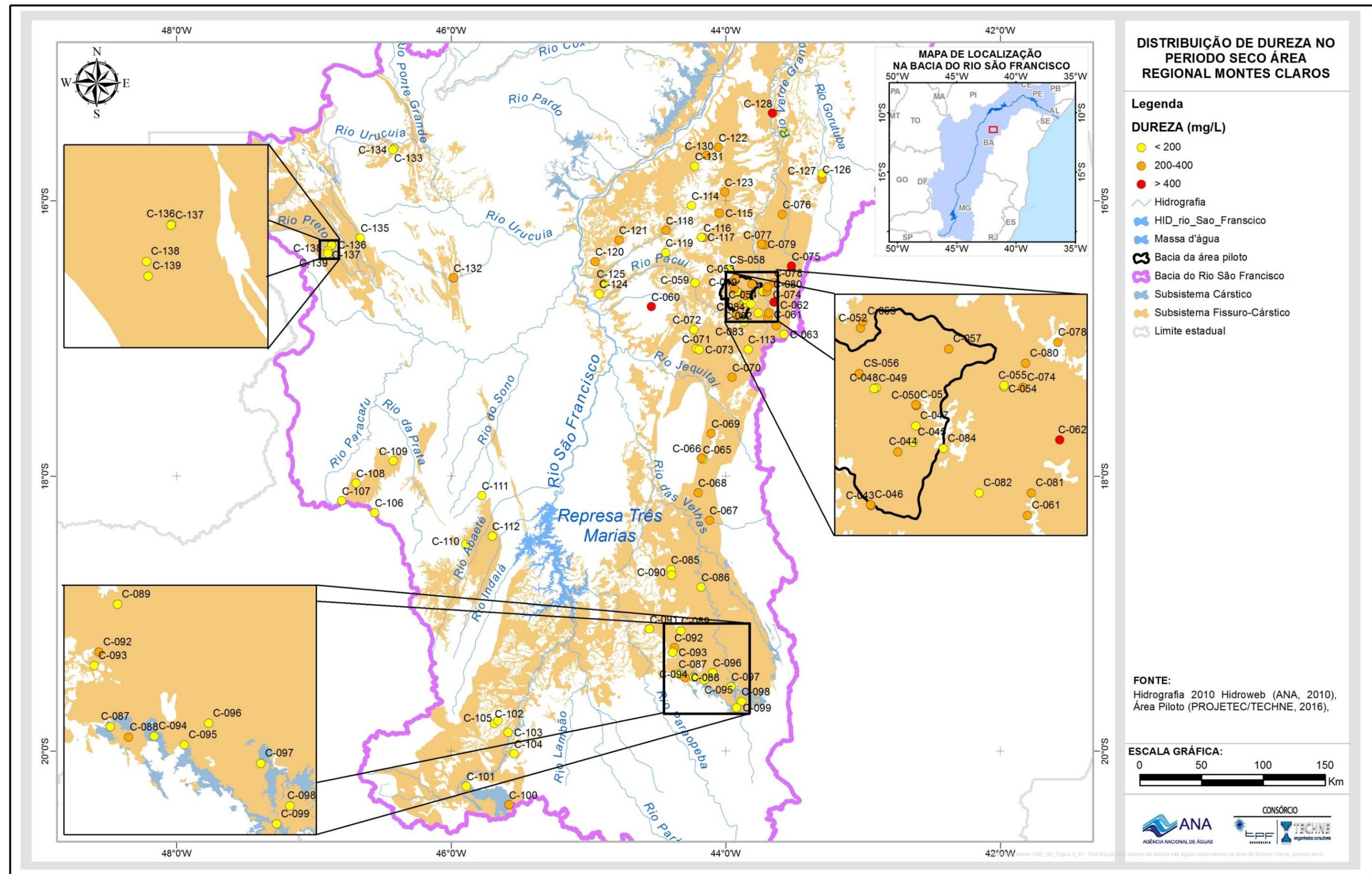


Figura 7.47: Distribuição dos valores de dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

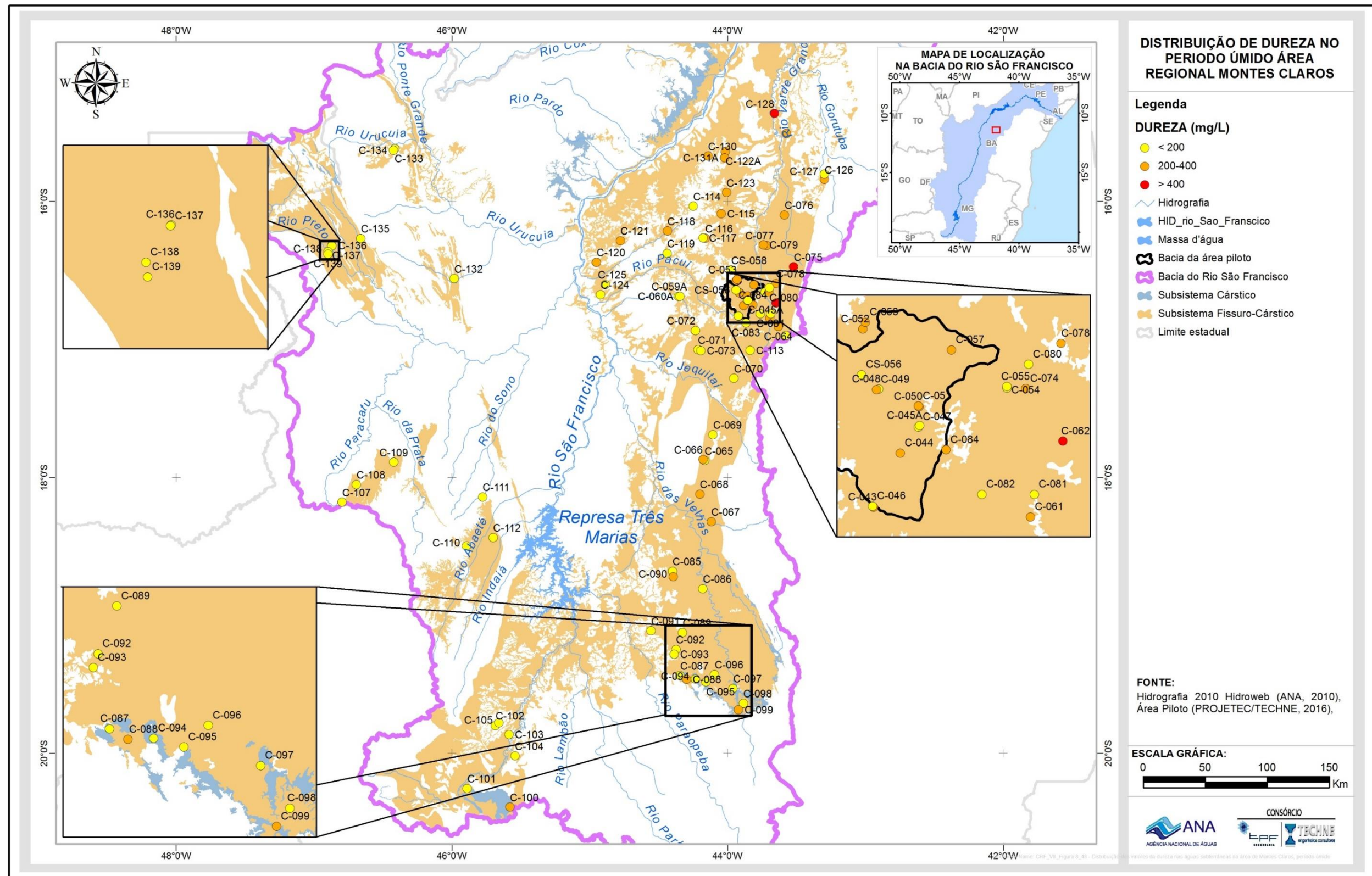


Figura 7.48: Distribuição dos valores da dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido.

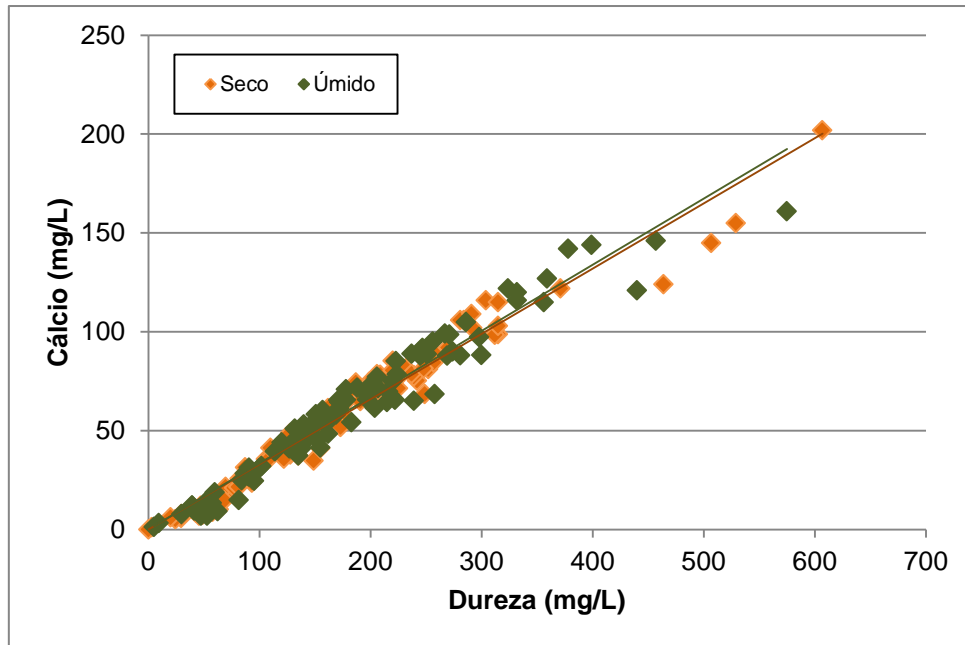


Figura 7.49: Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

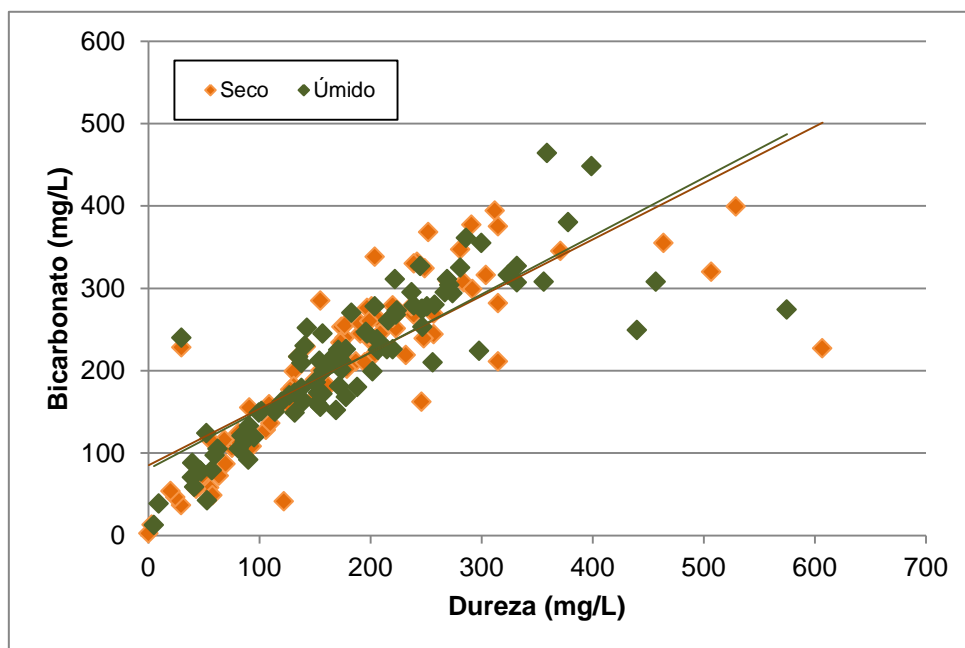


Figura 7.50: Correlação entre dureza e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

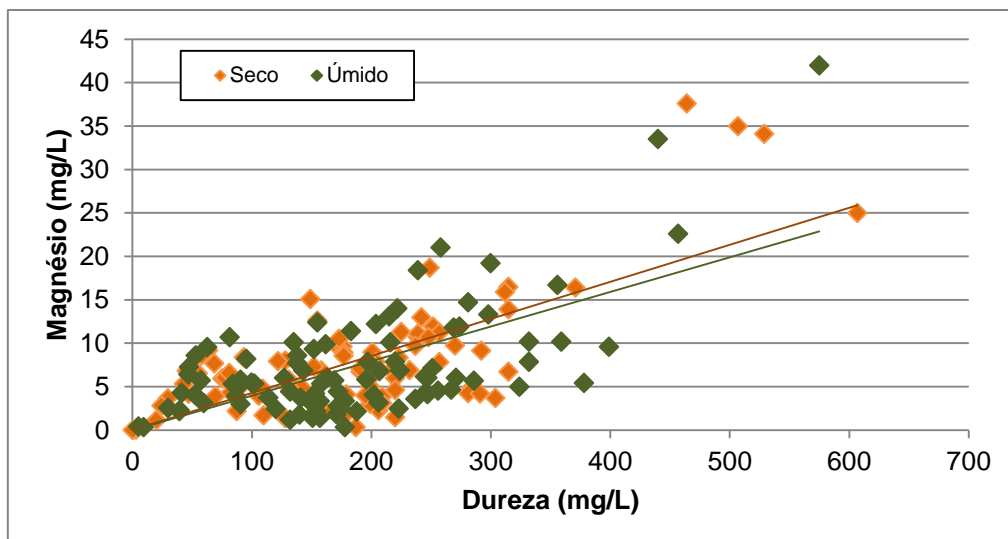


Figura 7.51: Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

7.4.2 Fácies hidroquímicas

Na Figura 7.52 estão representados os diagramas de Piper (Piper, 1944) das amostras de água analisadas, para o período seco e úmido, na área de estudo. Diagrama de Piper possibilita a classificação das águas e permitem comparar distintos grupos químicos.

De maneira geral, observa-se um predomínio de águas no amplo campo das bicarbonatadas cálcicas, e algumas poucas amostras cloretadas cálcicas ou sulfatadas cálcicas e em menor proporção bicarbonatadas sódicas.

Em relação ao conteúdo iônico (avaliado no Piper através dos intervalos definidos para STD) as águas bicarbonatadas (independente do cátion dominante) apresentam salinidade inferior a 600 mg/L. Ainda que não se apresente de forma tão significativa, observa-se uma tendência da maioria das amostras com menor salinidade (inferior a 200 mg/L, azul claro no Piper) apresentarem maior conteúdo bicarbonatado que as demais, enquanto nas águas com STD entre 200 e 400 mg/L observa-se um sutil aumento no componente cloretado.

Fica claro que as águas cloretadas cálcicas e sulfatadas cálcicas (azul escuro no Piper) se destacam das demais por apresentarem salinidade superior a 600 mg/L.

A distribuição espacial das fácies hidroquímicas pode ser visualizada na Figura 7.53 e Figura 7.54, para os períodos seco e úmido, respectivamente. Observa-se que, para ambos os períodos, a maior parte da área é composta por águas bicarbonatadas cálcicas a bicarbonatadas mistas (com predomínio das cálcicas e magnesianas), e em menor proporção bicarbonatadas cloretadas mistas. Essas fácies representam a dissolução das rochas carbonáticas que compõem o meio aquífero.

Diferem-se dessas águas, setores localizados nas proximidades da área piloto e no extremo nordeste da área, onde se observa a ocorrência de águas com as fácies citadas a seguir, as quais também, conforme verificado através do diagrama de Piper, se destacam por apresentar salinidade mais elevada em relação às demais amostras:

- *Águas Bicarbonatadas sulfatadas cálcicas a Sulfatadas bicarbonatadas mistas predominam a leste da área piloto:* A origem do sulfato e cálcio nessas águas está relacionada à fácies da Formação Lagoa do Jacaré, portanto à fontes geogênicas, provavelmente relacionadas à dissolução de gipsita e/ou anidrita.
- *Águas Cloretadas bicarbonatadas mistas ocorrem na região de Jaíba:* O aporte pontual de cloreto provavelmente está relacionado ao enriquecimento natural propiciado por fatores climáticos, já que esse elemento não é constituinte mineral das rochas encontradas na área. A elevada solubilidade do elemento aliada a um ambiente de menor circulação de água pode provocar o seu aumento gradativo no aquífero, notadamente em ambientes de menor precipitação pluviométrica e elevada taxa de evaporação. De fato, na área regional de Montes Claros a faixa norte apresenta precipitação pluviométrica total inferior às demais porções da área de estudo.

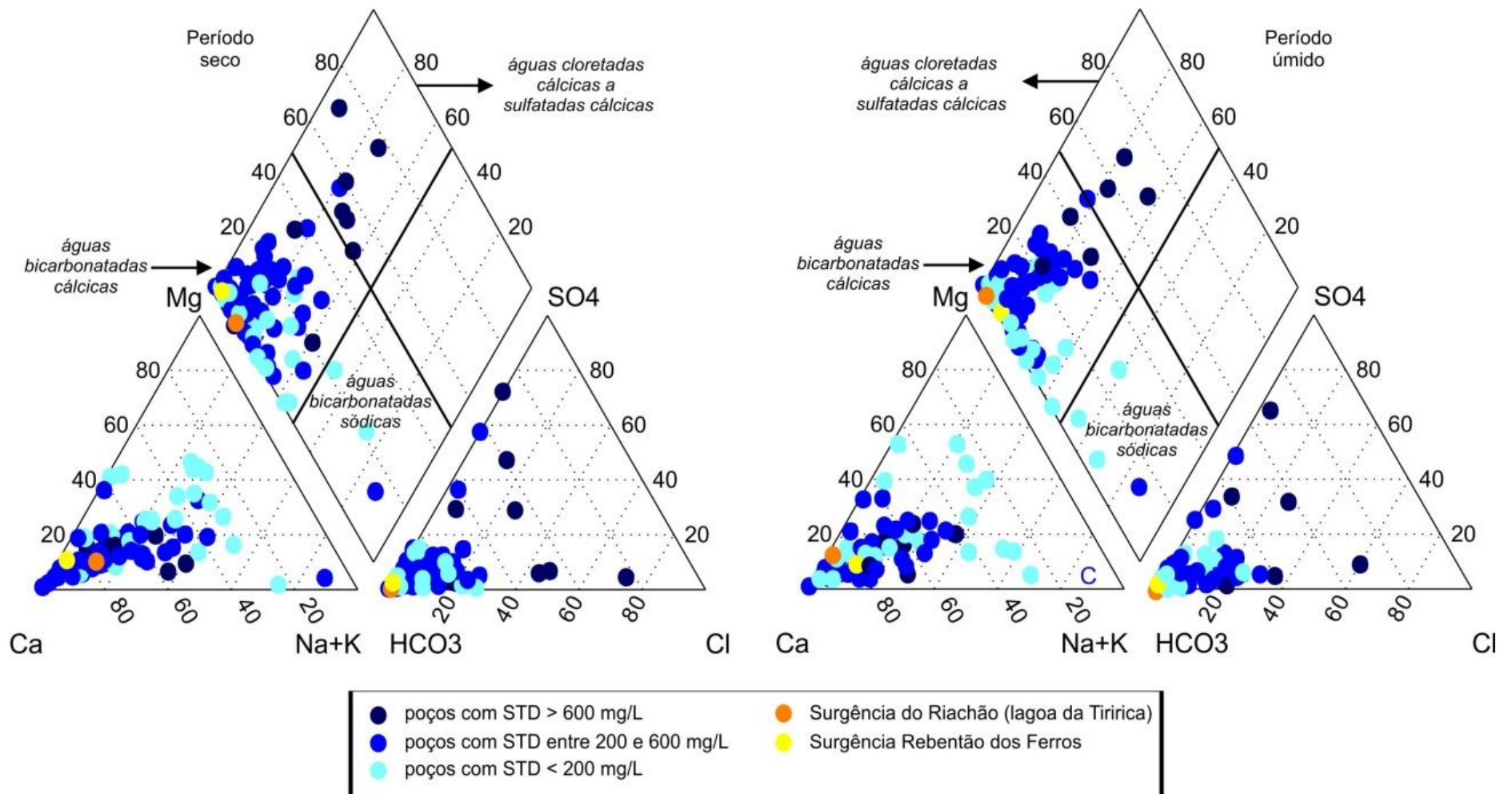


Figura 7.52: - Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Montes Claros e intervalos STD.

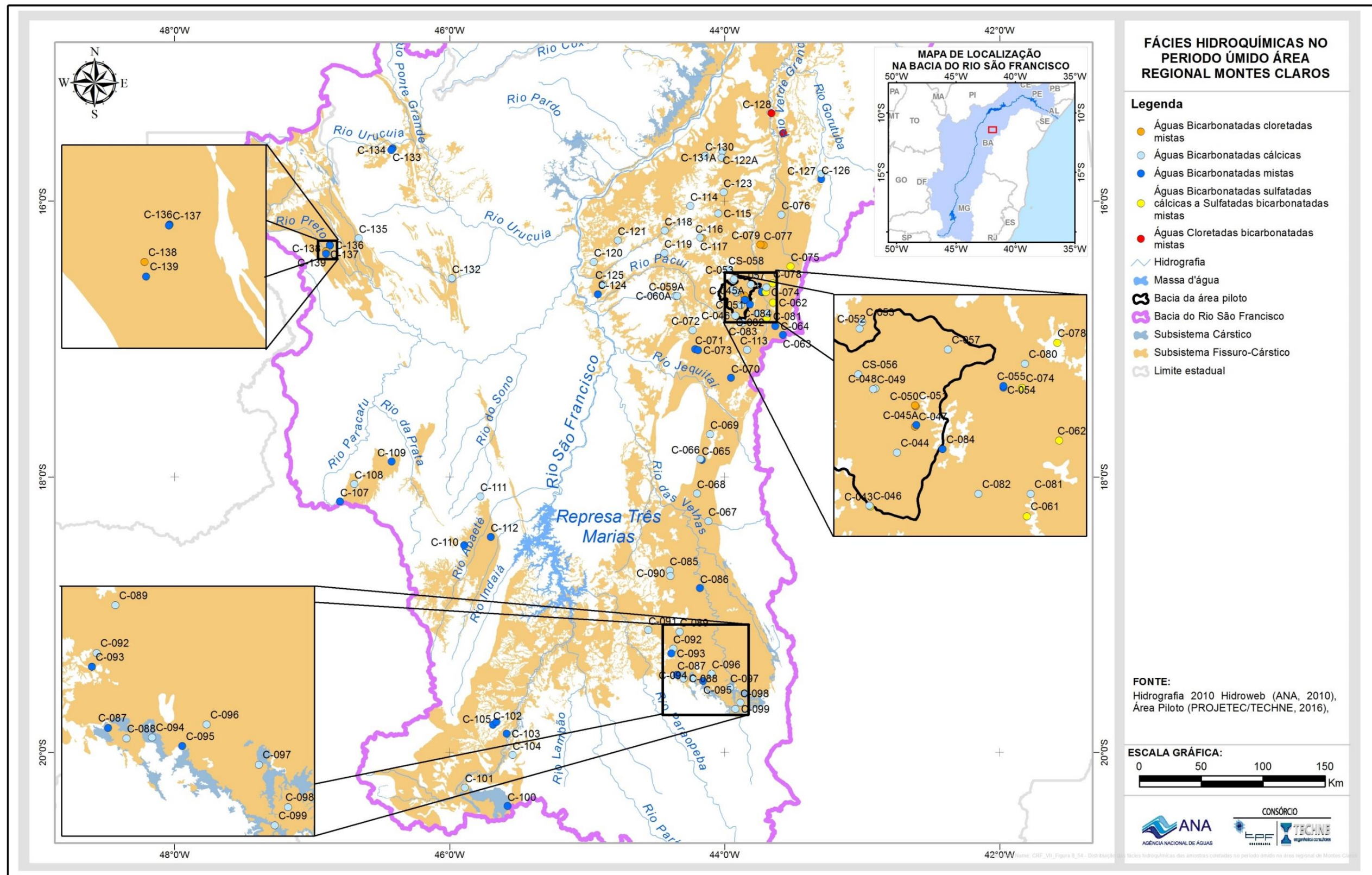


Figura 7.54: Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período úmido na área regional de Montes Claros.

7.4.3 Parâmetros Específicos

7.4.3.1 Metais Pesados

Foram analisados os metais pesados arsênio, boro, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco, em pontos previamente selecionados no entorno de fontes potenciais de contaminação. Essa seleção foi realizada mediante a análise do mapa de uso de solo e cadastro de fontes de contaminação.

Na área regional de Montes Claros foram realizadas 36 coletas para metais pesados, cuja localização encontra-se na Figura 7.34 e os resultados analíticos apresentados na Tabela 7.24.

Todas as determinações para cádmio e mercúrio foram abaixo do limite de quantificação do método de análise. Para os demais parâmetros (arsênio, boro, bário, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) os resultados detectados foram da ordem de traço ou abaixo do LQ, cuja presença deve estar ligada a fatores naturais, portanto, em todos os casos, abaixo do VMP da Portaria MS nº 2914 (2011).

7.4.3.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 5 amostras na área regional de Montes Claros, cuja localização encontra-se na Figura 7.34, as quais:

05 poços: C-053, C-057, C-086, C-116, C-124, C-125 e C-128

03 superficiais: CS-211 (Gruta do Jamelão – Itacarambi), CS-212 (Lagoa de Pedra – Bambuí) e CS-213 (Rio Verde Grande – Jaíba).

Os pontos destinados às análises de agroquímicos estão localizados em áreas agrícolas potencialmente sob a influência do uso de fertilizantes e pesticidas. Foram avaliados 42 agroquímicos, elencados no item 7.1 do presente relatório. A seleção dos compostos analisados foi realizada mediante o cadastramento das principais culturas agrícolas existentes na área, e posterior levantamento em campo e em instituições, dos princípios agroquímicos empregados. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de detecção. A não detecção desses compostos pode denotar a sua inexistência ou a presença em quantidades muito reduzidas.

Tabela 7.24 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros

Parâmetro	Arsênio	Boro	Bário	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Mercúrio	Níquel	Zinco
VMP ¹	0,01	-	0,7	0,005	0,01	2	0,05	0,001	0,07	5
C-043	< 0,001	< 0,001	0,00564	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00212
C-044	< 0,001	< 0,001	0,00882	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00318
C-045A	< 0,001	< 0,001	0,0155	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0198
C-046	0,00103	< 0,001	0,00829	< 0,001	0,00163	0,00126	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0256
C-047	< 0,001	< 0,001	0,0224	< 0,001	< 0,001	0,00136	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0193
C-048	< 0,001	0,0441	0,0272	< 0,001	0,00337	0,0139	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0044
C-049	< 0,001	0,00922	0,0274	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0035
C-050	< 0,001	0,00963	0,0263	< 0,001	< 0,001	0,00235	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,195
C-051	< 0,001	0,101	0,0417	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00683
C-052	< 0,001	< 0,001	0,025	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,226

Tabela 7.24 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros – Continuação.

Parâmetro	Arsênio	Boro	Bário	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Mercúrio	Níquel	Zinco
C-053	< 0,001	< 0,001	0,0246	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	< 0,001
C-054	< 0,001	< 0,001	0,00414	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,13
C-055	< 0,001	< 0,001	0,00335	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0156
C-057	< 0,001	< 0,001	0,042	< 0,001	< 0,001	0,00526	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0132
C-059A	< 0,001	< 0,001	0,195	< 0,001	< 0,001	0,00274	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00814
C-061	< 0,001	0,0321	0,0177	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00862
C-072	< 0,001	< 0,001	0,0204	< 0,001	< 0,001	0,00434	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0141
C-078	< 0,001	< 0,001	0,00938	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,085
C-080	< 0,001	< 0,001	0,00752	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00756
C-087	< 0,001	< 0,001	0,00622	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0673

Tabela 7.24 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros – Continuação.

Parâmetro	Arsênio	Boro	Bário	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Mercúrio	Níquel	Zinco
C-088	< 0,001	< 0,001	0,0786	< 0,001	< 0,001	0,00118	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0748
C-091	< 0,001	< 0,001	0,0393	< 0,001	< 0,001	0,00671	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,016
C-100	< 0,001	< 0,001	0,11	< 0,001	0,00569	0,0258	0,00237	< 0,0001	< 0,001	0,043
C-104	< 0,001	< 0,001	0,0204	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00894
C-105	< 0,001	< 0,001	0,0134	< 0,001	0,00237	0,00799	0,00146	< 0,0001	0,00468	0,0805
C-113	< 0,001	< 0,001	0,00636	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0142
C-120	< 0,001	0,0293	0,0482	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0377
C-123	< 0,001	< 0,001	0,0396	< 0,001	< 0,001	0,00122	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	< 0,001
C-126	< 0,001	0,0186	0,354	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0098
C-127	0,0057	< 0,001	0,32	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00367
C-128	< 0,001	0,0416	0,11	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00182

Tabela 7.24 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros – Continuação.

Parâmetro	Arsênio	Boro	Bário	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Mercúrio	Níquel	Zinco
C-132	< 0,001	< 0,001	0,0427	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	0,00162	0,0578
C-133	< 0,001	< 0,001	0,00986	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	< 0,001
C-134	< 0,001	< 0,001	0,0191	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,00239
C-135	< 0,001	< 0,001	0,0105	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,0105
C-138	< 0,001	< 0,001	0,197	< 0,001	< 0,001	0,00373	< 0,001	< 0,0001	0,00353	0,0101

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria n° 2914/202.

7.4.3.3 Derivados de Petróleo

Na avaliação desses compostos foram selecionados poços para a investigação de eventuais ocorrências de contaminantes em áreas no entorno de postos de combustíveis e oficinas mecânicas.

Foram avaliados os parâmetros benzeno, etilbenzeno, tolueno, m,p-xilenos, o-xileno, xilenos e índice de fenóis. Para avaliação desses compostos foram analisadas 36 amostras (Tabela 7.25) cuja localização encontra-se na Figura 7.34. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 7.25 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.

Parâmetro	Benzeno (µg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Índice de Fenóis (mg/L)	m,p-Xilenos (µg/L)	o-Xileno (µg/L)	Tolueno (mg/L)	Xilenos (mg/L)
VMP ¹	5	0,2	-	-	-	0,17	0,3
C-043	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-044	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-045A	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-046	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-047	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-048	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-049	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-050	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-051	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-052	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-053	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-054	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-055	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-057	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-059A	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-061	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-072	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-078	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-080	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-087	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-088	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-091	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003

Tabela 7.25 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo – Continuação.

Parâmetro	Benzeno (µg/L)	Etilbenzeno (mg/L)	Índice de Fenóis (mg/L)	m,p- Xilenos (µg/L)	o-Xileno (µg/L)	Tolueno (mg/L)	Xilenos (mg/L)
C-100	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-104	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-105	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-113	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-120	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-123	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-126	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-127	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-128	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-132	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-133	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-134	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-135	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003
C-138	< 1	< 0,001	< 0,001	< 2	< 1	< 0,001	< 0,003

¹: Valor Máximo Permitido (VMP) para as águas de consumo humano pela Portaria nº 2914/2011

7.4.4 Qualidade das Águas para o Consumo Humano

Uma água pode ser considerada potável quando é passível de consumo humano sem perigo nenhum para sua saúde. A definição dos padrões de potabilidade é função dos órgãos sanitários de cada país, no entanto percebe-se uma tendência mundial de normalização das regulamentações existentes.

No Brasil, a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Os parâmetros considerados na referida Portaria e analisados no âmbito do estudo constam na Tabela 7.26 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 7.27 (substâncias organolépticas).

Tabela 7.26 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Substâncias Inorgânicas		
Arsênio	mg/L	0,01
Bário	mg/L	0,7
Cádmio	mg/L	0,005
Chumbo	mg/L	0,01
Cobre	mg/L	2
Cromo	mg/L	0,05
Fluoreto	mg/L F	1,5
Mercúrio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,07
Nitrato	mg/L N	10,0
Nitrito	mg/L N	1,0
Substâncias Orgânicas		
Benzeno	µg/L	5
Agrotóxicos		
Carbenzadim + Benomil	µg/L	120
Clorpirifós + Clorpirifós-Oxon	µg/L	30
Diurom	µg/L	90
Glifosato + Ampa	µg/L	500
Tebuconazol	µg/L	180

Tabela 7.27 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Amônia	mg/L NH ₃	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor aparente	uH	15
Dureza total	mg/L como CaCO ₃	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Sódio	mg/L	200
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000
Sulfato	mg/L	250
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	uT	5
Zinco	mg/L	5
Xilenos	mg/L	0,3

A avaliação dos resultados das análises químicas das amostras coletadas no âmbito do estudo em ambos os períodos amostrais, indicaram que os parâmetros STD, dureza, sulfato, cloreto, nitrato, ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras. A Tabela 7.28 sumariza o quantitativo de amostras impróprias para o consumo humano para cada parâmetro supracitado. Destacam-se os parâmetros ferro e manganês, já que os demais apresentam valores acima do VMP de forma pontual.

Tabela 7.28 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria n° 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano, na área regional de Montes Claros.

Parâmetro	Seco (n=97)	Úmido (n=96)
STD	3 amostras	1 amostra
Dureza	3 amostras	1 amostra
Sulfato	2 amostras	1 amostra
Cloreto	-	1 amostra
Nitrato	1 amostra	2 amostras
Ferro	27 amostras (28%)	27 amostras (28%)
Manganês	26 amostras (27%)	17 amostras (18%)

7.4.5 Avaliações Isotópicas

As avaliações isotópicas foram realizadas por meio da caracterização dos isótopos ambientais de oxigênio e hidrogênio e radiogênico de estrôncio, em amostras de águas coletadas na rede monitoramento qualitativo definida no presente estudo. Foram coletadas 19 amostras, na segunda campanha (período úmido), cujos resultados são apresentados na Tabela 7.29.

Tabela 7.29 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Montes Claros.

Amostra	Situação	Oxigênio-18 (‰ VSMOW)	Deutério (2H) (‰ VSMOW)	Estrôncio (87Sr/86Sr)
C-063	Água subterrânea	-6,14	-39,3	0,70967
C-073	Água subterrânea	-5,7	-38,4	0,70891
C-090	Água subterrânea	-6,74	-45,5	0,70794
C-096	Água subterrânea	-6,89	-46,4	0,70928
C-097	Água subterrânea	-6,91	-46,3	0,70811
C-101	Água subterrânea - Misto	-6,99	-47,7	0,70812
C-105	Água subterrânea	-6,88	-48,2	0,71254
C-107	Água subterrânea	-7	-47,4	0,71929
C-111	Água subterrânea - Arenito	-6,61	-44,2	0,72220
C-120	Água subterrânea	-4,94	-34,3	0,70886
C-129	Água subterrânea	-5,81	-38,9	0,71414
C-133	Água subterrânea	-5,3	-36,3	0,71331
C-138	Água subterrânea	-5,28	-37	0,71334
CS-058	Surgência do Riachão (Lagoa da Tiririca)	-5,8	-39,3	0,70827
CS-211	Gruta do Janelão (Itacarambi)	-4,47	-29,6	0,71073
CS-212	Lagoa de Pedra (Bambuí)	-1,92	-21,8	0,71633
CS-214	Surgência do Mocambo (Matozinho)	-6,3	-43,4	0,70819
CS-215	Surgência da Caucaia (Matozinho)	-6,12	-44,2	0,70832
CS-216	Surgência da Gordura (Matozinho)	-6,52	-44,4	0,70858

7.4.5.1 Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério ($\delta^2\text{H}$)

As razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ estão representadas na Figura 7.55, juntamente com a reta meteórica mundial (RMM).

A amostra da Lagoa de Pedra (CS-212) destaca-se das demais por apresentar maior enriquecimento isotópico e maior distanciamento da RMN, sugerindo um

enriquecimento em isótopos pesados, o qual deverá estar relacionado com o fracionamento isotópico associado à evaporação da água, já que essa amostra refere-se a uma água superficial e, portanto, mais diretamente afetada pelo processo de evaporação.

Para os demais resultados isotópicos observa-se a formação de dois conjuntos com padrões de razões isotópicas distintas, os quais:

- Águas menos enriquecidas em ^{18}O e D situadas na faixa sul da área de estudo ($\delta^{18}\text{O}$ entre -7 e -6,12‰ VSMOW e $\delta^2\text{H}$ entre -48,2 a -43,4‰ VSMOW), círculos amarelos na Figura 7.55 – Nesse conjunto estão as amostras dos poços C-090, C-096, C-097, C-101, C-105, C-107 e C-111, além das surgências do Mocambo (CS-214), Caucaia (CS-215) e Gordura (CS-216).
- Águas mais enriquecidas em ^{18}O e D situadas na faixa norte da área de estudo ($\delta^{18}\text{O}$ entre -6,14 e -4,47‰ VSMOW e $\delta^2\text{H}$ entre -39,3 a -29,6‰ VSMOW), círculos vermelhos na Figura 7.56 – Nesse conjunto estão as amostras dos poços C-063, C-073, C-120, C-129, C-133 e C-138, além da surgência do Riachão (CS-058) e Gruta do Janelão (CS-211).

Essa diferença provavelmente reflete o componente climático, na medida em que se observa uma redução da precipitação pluviométrica de sul para norte e, sobretudo, um aumento da taxa de evaporação nesse mesmo sentido.

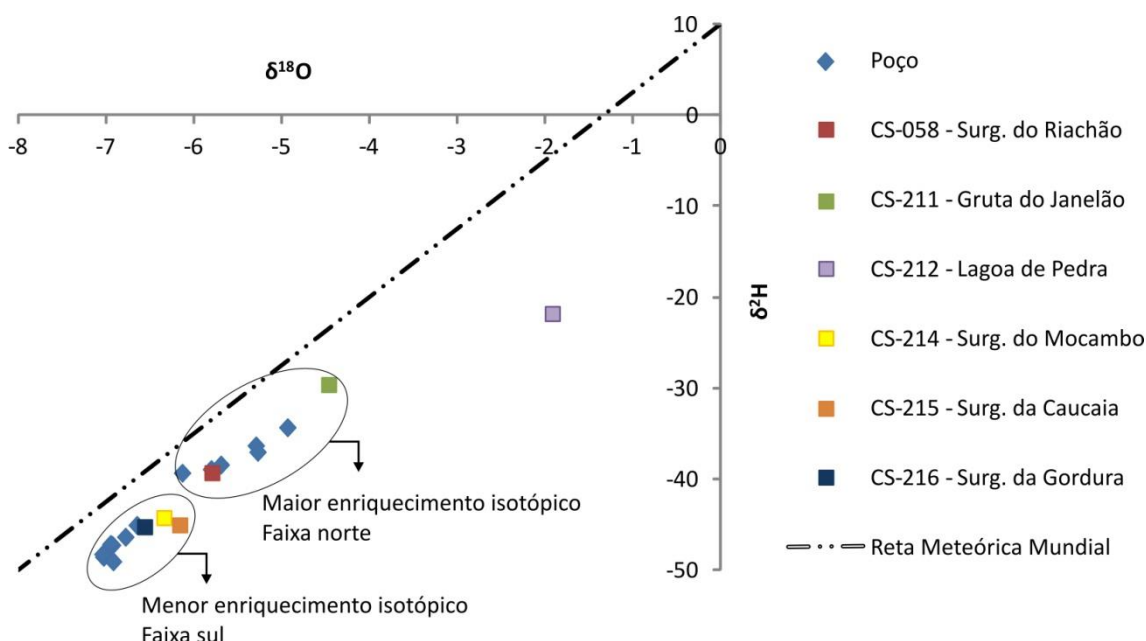


Figura 7.55: Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras.

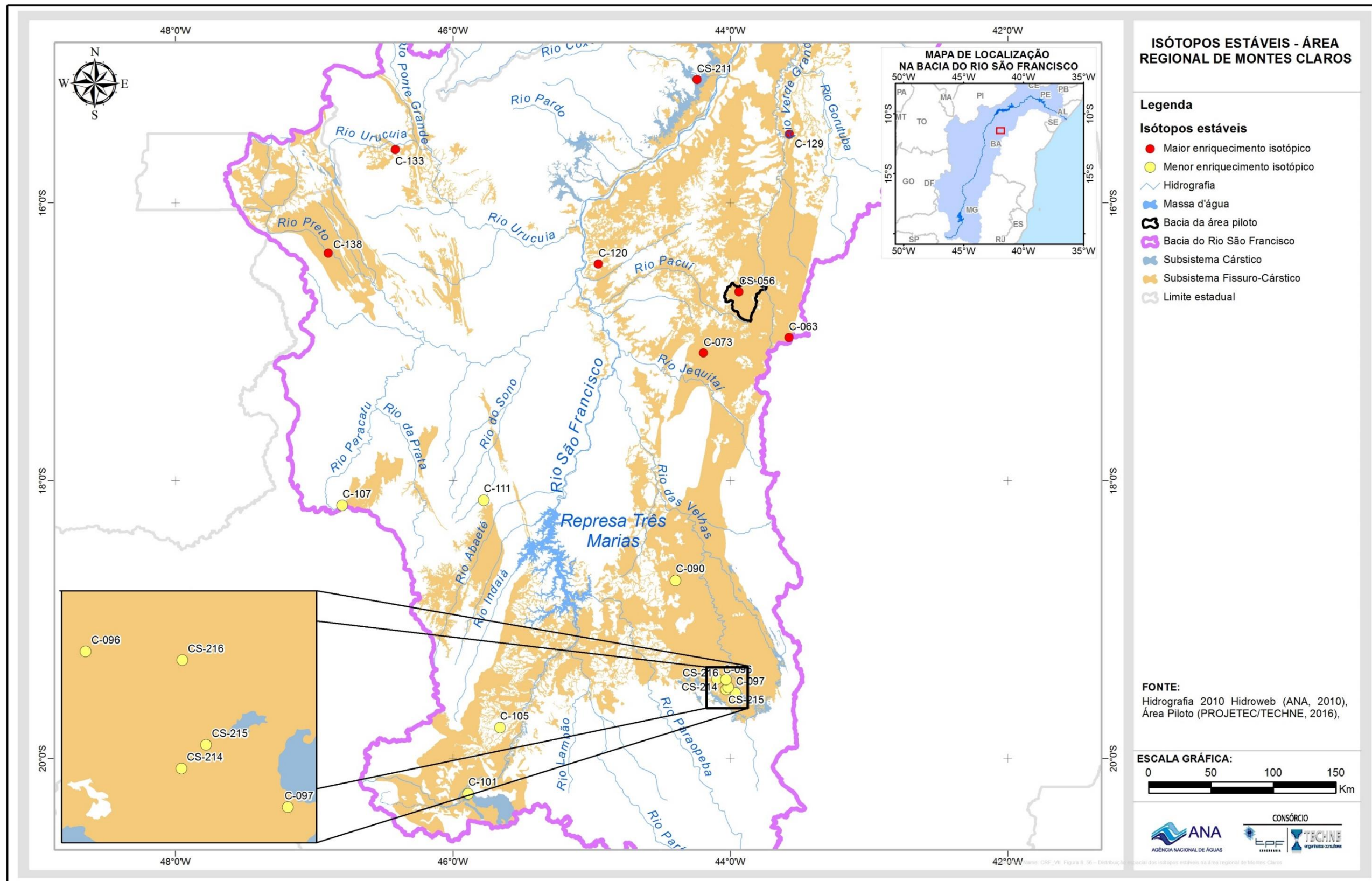


Figura 7.56: Distribuição espacial dos isótopos estáveis na área regional de Montes Claros

7.4.5.2 Isótopos radiogênicos de Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

A composição isotópica de estrôncio na água subterrânea é adquirida, inicialmente, na área de recarga, e posteriormente ao longo do caminho de fluxo por dissolução dos minerais e reações de troca iônica (Frost & Toner, 2004). A água adquire progressivamente a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das rochas com as quais interage. Diferenças nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ refletem diferenças na quantidade relativa de estrôncio derivada de diferentes minerais (Kendal & McDonnell, 1988).

Nas águas superficiais, a composição isotópica de estrôncio é primeiramente controlada pelas rochas que elas percorrem, por sua composição química e idade (Banner, 2004). Já nas águas subterrâneas, a variação isotópica de estrôncio é semelhante às das águas superficiais, refletindo idade e o tipo de rocha do aquífero, mas pode ser mais efetiva, já que a temperatura, pressão e forças iônicas são maiores em profundidade, além do que o tempo e a área de contato com a rocha, também, são maiores (Banner, 2004), promovendo uma maior interação água-rocha. A água subterrânea adquire estrôncio durante a recarga e ao longo do fluxo hidráulico, conforme ela interage com os minerais presentes no aquífero (Gosselin *et al.*, 2004).

Dessa forma, McNutt (2000) aponta que como calcitas, aragonitas e dolomitas são mais solúveis que a maioria dos silicatos e apresentam altas concentrações de estrôncio, as águas subterrâneas fluindo através de aquíferos carbonáticos tendem a apresentar, mais rapidamente, altas concentrações de estrôncio e baixas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, enquanto que em águas subterrâneas fluindo através de aquíferos silicáticos tendem a apresentar altas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e baixas concentrações de estrôncio.

Na área de estudo foram realizadas análises de isótopos de estrôncio na segunda campanha de amostragem (período úmido), nos pontos indicados na Tabela 7.29 e visualizados na Figura 7.56.

Com base na Tabela 7.29 observa-se que, de acordo com as razões obtidas, podem-se dividir as amostras em dois grupos:

- No primeiro grupo a razão de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variou de 0,70794 (C-090) a 0,70997 (C-063) – Nesse conjunto estão os poços em que as coberturas areníticas são pouco espessas ou insignificantes (C-063, C-073, C-090, C-096, C-101 e C-120), e portanto, a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mostra-se menor.
- No segundo grupo a razão de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variou 0,71929 (C-107) a 0,71254 (C-105) – Nesse conjunto estão os poços que apresentam maiores espessuras areníticas (C-105, C-107, C-129, C-133, C-138) e portanto, a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ apresenta-se maior, quando comparado ao primeiro grupo.

Nota-se, portanto, que as razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ crescem quando as águas têm contribuição das coberturas areníticas; corroborando com a razão obtida para o poço C-111 que capta águas unicamente no arenito, com razão da ordem de 0,7222. Essa razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mais alta deve-se a constituições silicáticas, conforme relatado por McNutt (2000).

Para as águas da gruta do Janelão e da lagoa de Pedra, observa-se que a razão isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,71073 e 0,71633, respectivamente, similares ao poço com filtro no arenito (C-111), sugerindo uma contribuição das coberturas areníticas, quando a mesma está presente de forma espessa e assenta diretamente sobre o Grupo Bambuí. As águas das surgências do Mocambo, Caucaia e Gordura têm respectivamente razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,70819, 0,70832 e 0,70858, semelhantes às águas dos poços que têm pouca ou nenhuma contribuição das águas das coberturas areníticas.

7.4.6 Considerações Finais

Área Regional de Irecê

A hidroquímica das águas do aquífero Salitre na área regional de Irecê é governada principalmente por processos naturais de interação água-rocha em ambiente carbonático e fatores climáticos. Secundariamente observa-se a interferência dos fatores antrópicos, que se refletem na presença de teores elevados de nitrato nessas águas, relacionados à ausência de esgotamento sanitário e tratamento adequado e/ou decorrentes das atividades agrícolas empregadas na área.

Os processos naturais de interação água-rocha dão origem a águas preferencialmente bicarbonatadas cálcicas, predominantemente doces (<1000 mg/L de STD) e com dureza inferior a 600 mg/L. Espacialmente, esses setores correspondem à porção leste da área piloto, onde a quantidade significativa de zonas preferenciais de carstificações existentes proporcionam uma recarga expressiva e rápida circulação de água, e nos setores próximos aos afloramentos de rochas (Formação Morro do Chapéu) e sedimentos (coberturas Cenozoicas) siliciclásticos que propiciam maior aporte e diluição das águas carbonáticas.

Nos setores em que o calcário apresenta-se mais compacto (menos carstificado) e, conseqüentemente as águas no meio aquífero experimentam uma menor circulação e renovação, predominam as fácies cloretadas cálcicas, com a maior salinidade do conjunto amostral (entre 1000 a 5000 mg/L) e dureza superior a 600 mg/L. Aliado a esse cenário hidrogeológico e estrutural exposto, é provável também a influência do fator climático – no âmbito semiárido – que propicia uma concentração iônica progressiva dessas águas em resposta às elevadas taxas de evaporação.

As razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas águas dos poços completados totalmente nos calcários registram valores menores do que nos poços que possuem coberturas Cenozóicas. Esse comportamento indica, assim, que nesses últimos pode estar ocorrendo mistura de águas.

Área Regional de São Desidério

As amostras hidroquímicas do aquífero Bambuí na área regional de São Desidério foram agrupadas de acordo com as suas características geológicas/hidrogeológicas obtidas dos perfis litológicos dos poços, de forma a permitir uma avaliação pormenorizada da influência do aquífero Urucuia nas águas do aquífero Bambuí. A seguir são apresentados os dois grupos individualizados e as principais características observadas:

Aquífero Bambuí aflorante:

- São águas doces (STD<500 mg/L), com casos isolados de águas ligeiramente salobras (STD entre 1000 e 3000 mg/L). As águas mais enriquecidas (>800 mg/L) concentram-se na faixa leste da área, isto é, mais distantes geograficamente das áreas de exposição dos arenitos do Grupo Urucuia. Na faixa central e oeste a menor salinidade das águas do aquífero Bambuí aflorante pode denotar a influência do aquífero Urucuia, inclusive por diluição advinda do fluxo regional a partir dos setores em que localmente ambas as unidades hidrogeológicas estão hidráulicamente conectadas. Ainda, localmente a presença de calcarenitos intercalados nos calcários e a proximidade com as drenagens superficiais podem explicar essa diminuição na salinidade.
- São águas duras (entre 100 a 200 mg/L) a muito duras (>200 mg/L). As águas de dureza mais elevada, de forma similar ao observado para a salinidade, estão localizadas na faixa leste da área. Esse setor está mais distante da área de afloramento das rochas siliciclásticas do Grupo Urucuia, que propiciam o abrandamento das águas, pelos mesmos motivos expostos para a salinidade das águas.
- Predominam águas levemente neutras a alcalinas, refletindo a expressiva concentração de bicarbonatos nas amostras.
- São águas predominantemente bicarbonatadas cálcicas e em menor proporção sulfatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. O conjunto de águas bicarbonatadas cálcicas apresenta baixo conteúdo iônico (geralmente com STD<600 mg/L). As águas com fácies sulfatadas cálcicas apresentam maior enriquecimento iônico do conjunto avaliado (STD>1000 mg/L).

Aquífero Bambuí recoberto:

- São águas doces, a maioria das amostras com salinidade inferior a 500 mg/L. Fica claro que as coberturas de arenitos Urucuia sobrepostas aos calcários do Grupo Bambuí contribuem para uma queda nos teores de STD nas águas do aquífero Bambuí. Esse comportamento pode estar relacionado a alta permeabilidade vertical e horizontal do Urucuia, que favorece a entrada e circulação da água de recarga (chuva) e, por

consequente, a rápida renovação de água no aquífero Bambuí, principalmente nas partes mais carstificadas e fraturadas do pacote calcário sotoposto.

- São águas duras (entre 100 a 200 mg/L) a muito duras (>200 mg/L), com todos os valores inferiores a 400 mg/L, portanto significativamente de menor dureza que as águas do Bambuí aflorante, cujo resultado atinge valores da ordem de 1000 mg/L. O abrandamento dessas águas provavelmente se dá pelos mesmos motivos expostos para a salinidade das águas.
- São águas neutras a alcalinas e predominantemente bicarbonatadas cálcicas.

Área Regional de Montes Claros

No aquífero Bambuí da área regional de Montes Claros predominam águas doces, com teor de STD inferior a 400 mg/L. Esses setores coincidem com a presença das rochas siliciclásticas de natureza quartzosa (correlacionadas ao Uruçua e/ou Areado) que recobrem o Bambuí, cuja ocorrência mais expressiva se dá na faixa oeste e centro-sul da área.

Os valores mais elevados de STD (entre 400 até pouco mais de 1000 mg/L) ocorrem no setor nordeste da área e correspondem aos locais de afloramentos de rochas calcárias mais puras. A dureza apresenta configuração semelhante, na medida em que as águas mais duras (>400 mg/L) ocorrem também no setor nordeste da área. Fica claro que as referidas coberturas influenciam na diluição e abrandamento das águas do aquífero Bambuí no setor estudado.

Essas águas de menor salinidade são predominantemente Bicarbonatadas cálcicas a Bicarbonatadas mistas (cálcicas e magnesianas), em consonância com a natureza carbonática do aquífero estudado.

Novamente o setor nordeste da área se destaca por apresentar padrão hidroquímico que difere dos demais setores, já que se observa a ocorrência de águas Sulfatadas, provavelmente correlacionadas a sulfetos da Formação Lagoa do Jacaré que ocorre nas proximidades da área piloto; além de águas Cloretadas na região de Jaíba. As referidas fácies contribuem para o aumento da salinidade das águas do aquífero Bambuí nessa porção.

8 Vulnerabilidade e perigo de contaminação

As atividades humanas e os elementos característicos do meio ambiente, especialmente do solo, tornam as águas subterrâneas cada vez mais propensas à poluição.

A avaliação da vulnerabilidade em aquíferos permite conhecer os fatores que comprometem a qualidade da água e os riscos de contaminação. Isso porque

está relacionada à maior ou menor suscetibilidade de um aquífero ser atingido por carga poluidora.

De acordo com Santos *et al.* (2010), é importante lembrar que pelo fato de existir um aquífero com alto índice de vulnerabilidade não significa que este já esteja contaminado, mas sim que esta área é de risco. Sua contaminação ou não vai depender das atividades antrópicas que estão sobre ele localizadas, ou seja, este pode ser altamente vulnerável, mas não correr nenhum risco de ser contaminado por estar localizado numa área distante de fontes poluidoras. Assim, determinar o risco de poluição das águas subterrâneas serve para identificar quais aquíferos são mais vulneráveis à contaminação imposta pelas atividades humanas.

A vulnerabilidade de uma fonte de água subterrânea para os impactos humanos depende da capacidade de purificação do aquífero e do tempo de percolação das águas subterrâneas. Portanto, devido ao comportamento hidrológico heterogêneo de fluxo subterrâneo em aquíferos cársticos, a água ao atingir uma fonte de poluição representa a mistura de diferentes componentes ao aquífero (Santos *et al.*, 2010 apud Tripet *et al.*, 2000).

Para Frantz (2005), a alta vulnerabilidade natural dos cársticos se atribui a velocidade de circulação da água subterrânea relativamente alta e sua escassa interação contaminante-rocha, o que provoca uma elevada capacidade de propagação neste meio.

8.1 Metodologia EPIK

O método EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1998) é utilizado para avaliar a vulnerabilidade à contaminação em aquíferos cársticos, foi o primeiro método de cartografia de vulnerabilidade para esse tipo de sistema. O nome deriva de: Epicarste (E), Cobertura de Proteção (P), Condições de Infiltração (I) e Sistema de Carstificação (K), que são as características relacionadas ao fluxo e ao transporte através de sistemas cársticos

Na escala do presente projeto (1:250.000) não se pode, entretanto, identificar, de modo detalhado, diversas feições exigidas pelo método, tais como, sumidouros, cavidades, vales secos nem, tão pouco, o reconhecimento preciso das variações de espessura dos mantos de cobertura e da zona epicárstica sobre os aquíferos cársticos. Assim sendo, foi utilizada uma versão do EPIK adaptada para as condições regionais.

Nessa versão adaptada, os parâmetros E, P, I, K (iniciais que designam o método EPIK), têm as seguintes características.

8.1.1 Epicarste (E)

Inicialmente, foram digitalmente delineados, na escala 1:250.000, todos os ambientes de interesse ao desenvolvimento do carste, considerando-se naturalmente aqueles onde há presença de rochas calcárias as quais são

responsáveis por potencializar os efeitos de dissolução e o desenvolvimento dos relevos cársticos. A partir da separação de atributos relevantes da geologia e de certas feições cársticas conhecidas, dolinas principalmente, poderão ser inferidos os três domínios de interesse, quais sejam:

- E1 – Epicarste franco: em função do reconhecimento, em imagem digital, da ocorrência de afloramentos de rocha calcária; da ocorrência de zonas de densidade elevada de dolinas sobre coberturas cenozoicas, e sobre a ocorrência de dolinas em áreas quaisquer onde o desnível em relação ao nível de base local seja inferior a 20 m;
- E2 – Epicarste encoberto: em função do reconhecimento, em imagem digital, da ocorrência de: dolinas em quaisquer áreas cujo desnível em relação ao nível de base local seja superior a 20 m; padrões tectônicos ditados por alinhamentos estruturais sobre relevo cárstico residual das coberturas pelito-carbonáticas e psamo-pelíticas das Formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, Grupo Una – Formação Salitre; e zonas com presença de rochas carbonáticas cobertas por mantos de alteração diversos, mas associadas a domínios com intensidade de deformação elevada;
- E3 – Epicarste ausente: em função da ocorrência de rochas insolúveis em sua totalidade.

Para a classificação da área de estudo e de cada subdomínio, a partir do parâmetro E, foi utilizada a base geológica da CPRM de 2003, as informações de pontos e áreas de dolinas, a hidrografia da região e dados SRTM, que a partir do seu modelo digital de elevação, possibilitou a obtenção das cotas de elevação de toda a área do domínio.

A classificação foi realizada basicamente a partir das informações contidas na base geológica, analisando em qual classe (E1, E2, E3) se enquadraria cada unidade geológica, considerando as condições estabelecidas na metodologia adaptada.

Com as imagens SRTM foi realizada uma análise a fim de se obter o desnível entre dolinas e o nível de base local (curso de água mais próximo), tendo em vista que esse foi um critério estabelecido e que resultaria em classificações distintas dependendo do valor obtido.

Para essa análise, foram extraídas dos dados SRTM as cotas de elevação das dolinas e dos cursos de água. Utilizou-se então a técnica conhecida como “Polígonos de Thiessen” ou “Diagrama de Voronoi”, que gerou polígonos de influência e possibilitou identificar qual o nível de base local mais próximo de cada dolina. Assim, as cotas foram comparadas e as áreas com ocorrência de dolinas foram classificadas (desnível menor ou maior que 20 m).

Assim, toda a área de estudo foi classificada de acordo com as condições estabelecidas na metodologia.

8.1.2 Cobertura de proteção (P)

Baseado nas estimativas das espessuras dos materiais descritos em perfis de poços tubulares, a serem indicados em cada domínio hidrogeológico, como perfil-tipo adotado às regiões cujo comportamento estratigráfico seja considerado similar – verificando-se a tipologia de alteração (intemperismo) das rochas que constituem as formações geológicas mapeadas.

- P1 – presença de solos arenosos com espessura inferior a 20m sobre rocha carbonática; coberturas detríticas ou cenozoicas em cotas cujo desnível altimétrico em relação ao nível de base local seja inferior a 20 m;
- P2 – presença de materiais arenosos intercalados a solos silto-argilosos com espessura não superior a 10 m sobre rocha carbonática;
- P3 – presença de solos silto-argilosos com espessura não inferior a 20 m, sobre rocha carbonática.

Para a classificação da área, a partir do parâmetro P, foram utilizados os perfis de 203 poços perfurados na região do Carste. Estes perfis apresentaram informações sobre a litologia em variadas profundidades e foram correlacionados com o mapa de unidades de solo para uma ajudar na classificação. O mapa da área regional está apresentado na Figura 8.1 e foram feitos recortes desse mapa para os subdomínios e áreas piloto, que serão apresentados nos respectivos relatórios.

O resultado foram 203 pontos classificados quanto a sua cobertura de proteção. Logo, foi necessária a realização de uma interpolação espacial para a geração de valores para toda a superfície.

Assim, utilizando o interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW), a superfície contínua foi gerada para a área total de estudo, recortada para cada subdomínio e reclassificada nas três classes definidas: valor 1, valor 2 e valor 3.

8.1.3 Condições de infiltração (I)

Decorrente da tipologia dos materiais que conformam o topo das superfícies de relevo. Na escala de trabalho em questão, não se julga conveniente analisar diferentes declividades; uma vez que tais influências devem também se referir ao tipo de vegetação existente, remetendo-se a condições localizadas das bacias, sendo o tipo de material de cobertura o mais importante nos processos de infiltração.

- I1 – dentre os inúmeros ambientes onde se tem as melhores condições de infiltração, destacam-se aquelas onde os materiais constituintes de fração arenosa, predominantemente, compõem os arenitos Uruçua e Areado e as unidades calcárias expostas das Formações Sete Lagoas, Lagoa do Jacaré e Salitre;

- I2 – as coberturas detrítico lateríticas e cenozoicas assentadas sobre as formações carbonáticas Sete Lagoas, Salitre, Lagoa do Jacaré e unidade Paraopeba;
- I3 – terrenos constituídos por rochas vulcânicas, folhelhos, siltitos, argilitos, margas, xistos e filitos; todas as formações que tem seu processo de alteração atrelado à geração de argilas.

Para a classificação da área a partir do parâmetro I, foi utilizada a base geológica. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para a realização da classificação da área, analisando em qual classe (I1, I2, I3) se enquadraria cada unidade geológica.

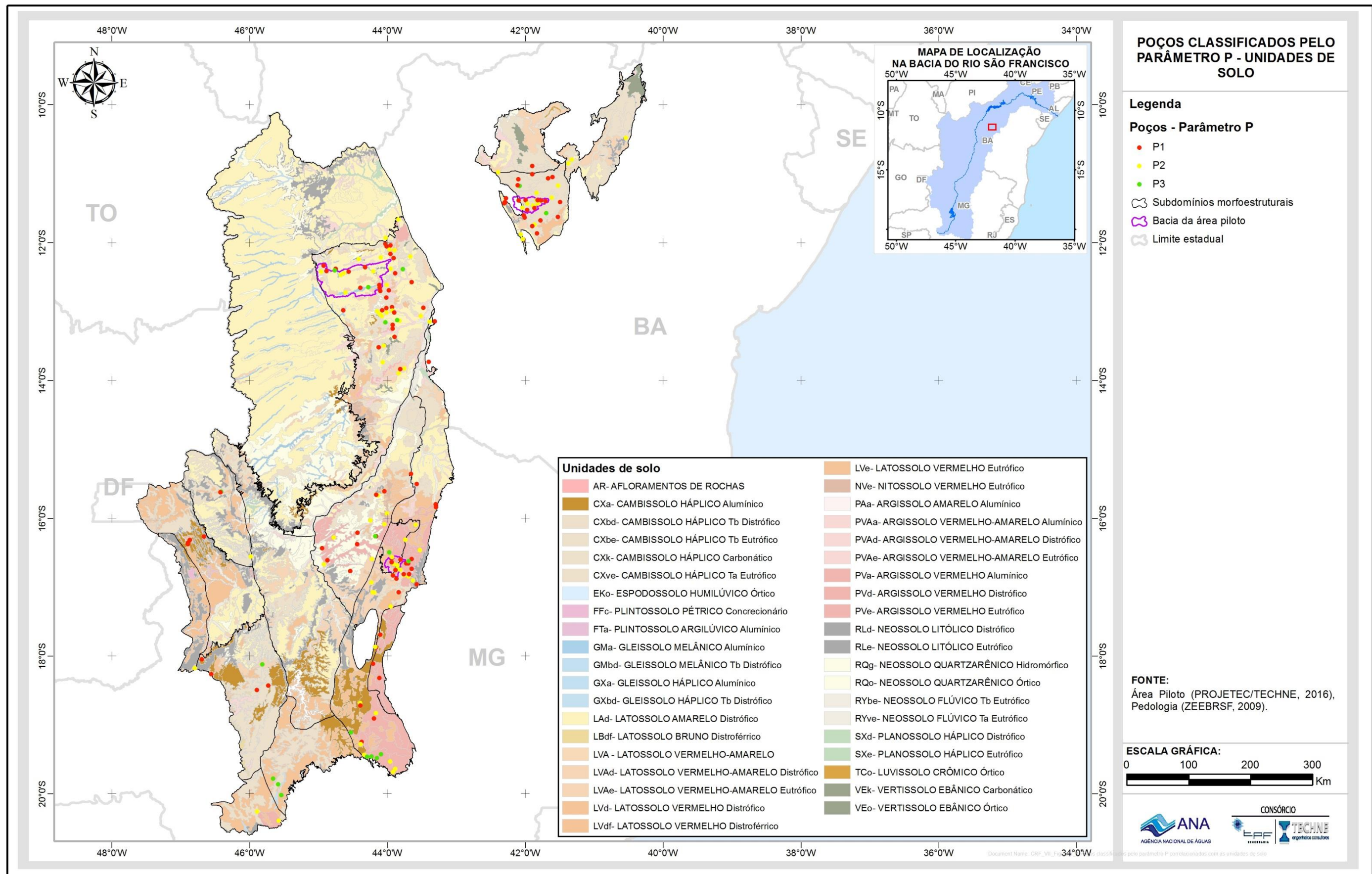


Figura 8.1: Poços classificados pelo parâmetro P correlacionados com as unidades de solo.

8.1.4 Grau de desenvolvimento da rede cárstica (K)

- K1 – moderado a muito desenvolvido: Formação Sete Lagoas aflorante, unidades calcárias da Formação Lagoa do Jacaré e calcários rasos a aflorantes da Formação Salitre; zonas proximais de dolinas e cavidades; e lineamentos estruturais que atravessam compartimentos geológicos.
- K2 – incipiente: unidades pelíticas da Formação Lagoa do Jacaré intercaladas com calcários; coberturas cenozoicas ou detríticas rasas sobre a unidade Paraopeba, Formação Sete Lagoas e Formação Salitre.
- K3 – não cárstico.

Para a classificação da área, a partir do parâmetro K, foi utilizada a base geológica. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para a realização da classificação da área total de estudo e de cada subdomínio, analisando em qual classe (K1, K2, K3) se enquadraria cada unidade geológica.

Com a área devidamente classificada para cada um dos parâmetros (Figura 8.2), foi possível realizar o cruzamento dessas informações a fim de gerar o mapa de vulnerabilidade da área de estudo (Figura 8.3).

Respeitando a fórmula da metodologia, que aponta pesos diferentes para cada parâmetro (3 para o E, 1 para o P, 3 para o I e 2 para o K), foi realizada a soma, através da técnica álgebra de mapas (ferramenta *Raster Calculator*) dos mapas classificados pelos parâmetros.

Após a geração do mapa, foi realizada uma reclassificação do mesmo com a finalidade de agrupar os valores obtidos para cada área específica dentro das classes estabelecidas na metodologia aplicada (Tabela 8.1).

Na Tabela 8.1 tem-se os valores de ponderação do EPIK adaptado e na (Tabela 8.2) as classes de vulnerabilidade adotadas para este estudo, utilizando a mesma equação do EPIK original (Equação 7.1).

Tabela 8.1 - Valores de ponderação dos parâmetros do EPIK adaptado

E1	E2	E3	P1	P2	P3	I1	I2	I3	K1	K2	K3
1	2	4	1	2	3	1	2	4	1	2	4

Tabela 8.2 - Classes de vulnerabilidade do índice EPIK adaptado

CLASSE DE VULNERABILIDADE	VALOR ATRIBUÍDO
Alta	< 16
Média	16 a 26
Baixa	> 26

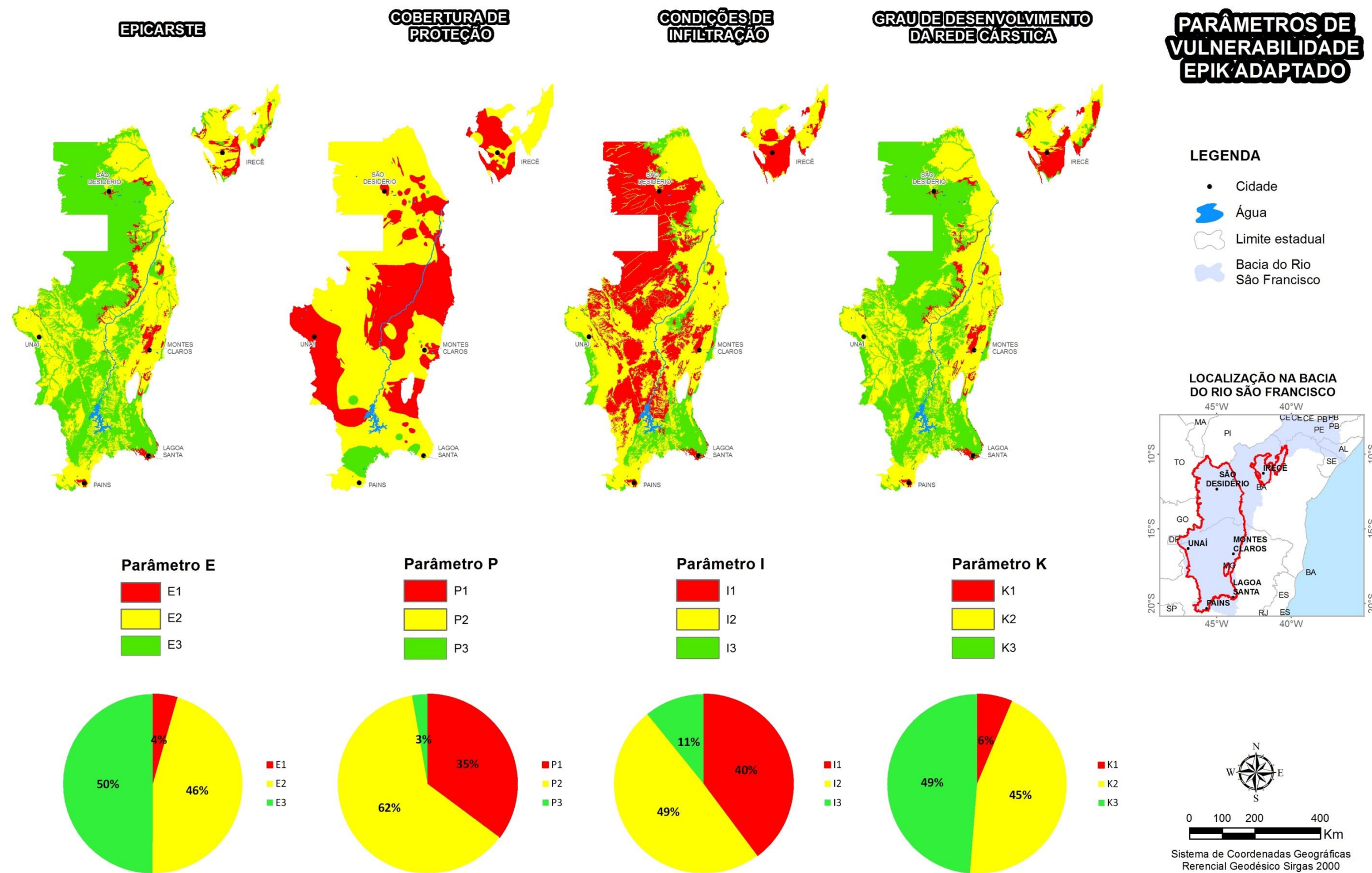


Figura 8.2: Classificação dos parâmetros de vulnerabilidade para a área geral de estudo.

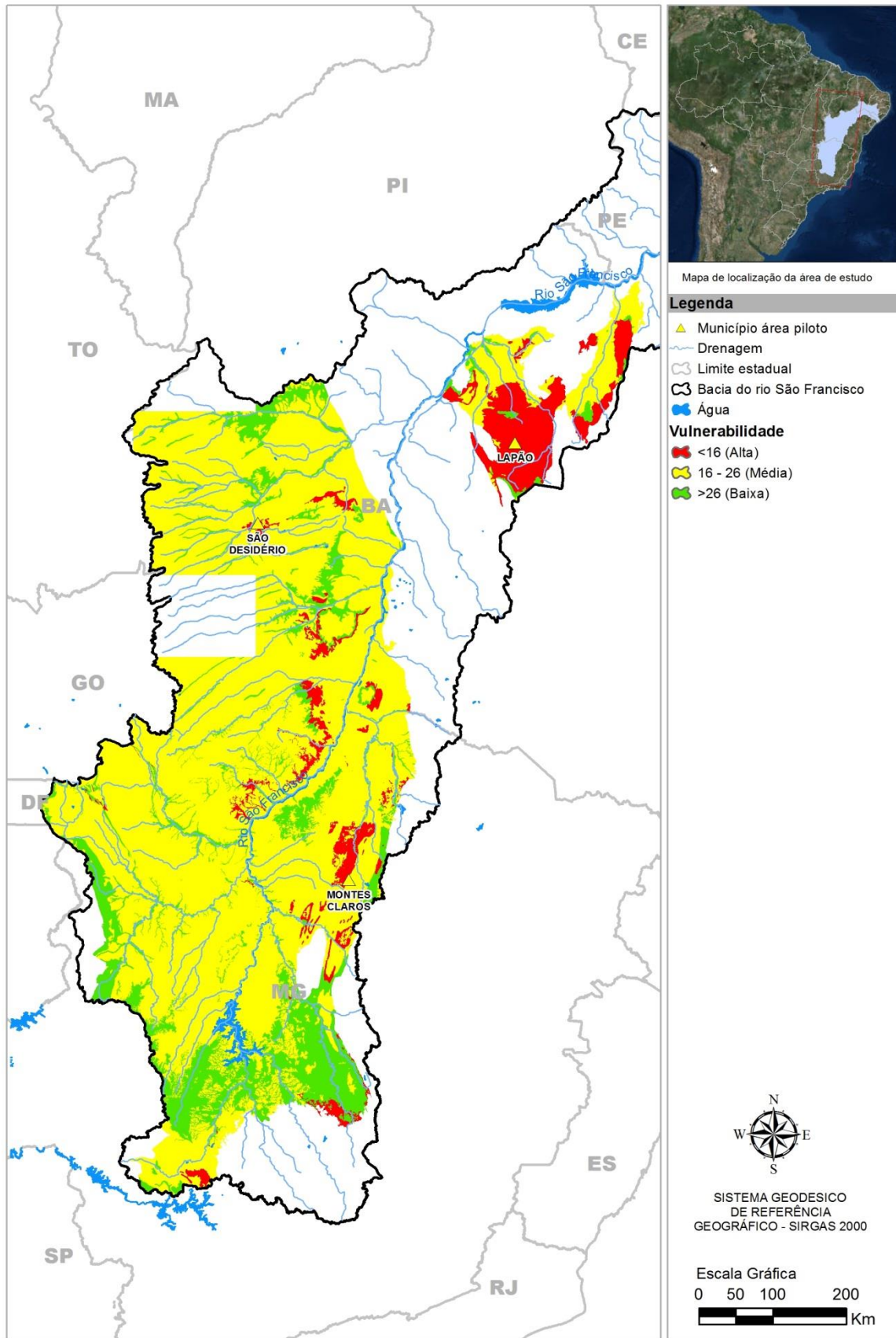


Figura 8.3: Mapa de vulnerabilidade da área geral de estudo

8.2 Metodologia POSH

Para classificar as fontes potenciais de contaminação, e, a partir delas, avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea, foi utilizado o método POSH – *Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically* (FOSTER *et al.*, 2002), baseado na origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica e produz três níveis qualitativos de geração de carga contaminante: reduzido, moderado e elevado.

8.2.1 Análise do potencial contaminante

As fontes contaminantes levantadas para a área total do estudo foram recortadas para cada subdomínio, obtendo 1272 fontes contaminantes nesta análise, localizadas nos municípios contidos em cada subdomínio. Assim, essas fontes foram classificadas segundo os três níveis de geração de carga do índice POSH (Tabela 8.3).

Tabela 8.3 – Fontes potenciais de contaminação com índice POSH.

ATIVIDADE		ÍNDICE POSH
Aterro controlado		Moderado
Aterro sanitário		Reduzido
Lixão		Elevado
Esgotamento sanitário		Elevado
Cemitério		Moderado
	Tipo 1	Reduzido
Indústria	Tipo 2	Moderado
	Tipo 3	Elevado
Posto de combustível		Elevado
Lavoura temporária		Elevado

Conforme indicado na Tabela 8.3, as indústrias possuem um índice POSH que varia de acordo com o tipo. A (Tabela 8.4) apresenta os diferentes tipos de indústrias com o índice POSH.

Tabela 8.4 – Tipos de indústrias com índice POSH.

INDÚSTRIAS		ÍNDICE POSH
Tipo 1	Madeireiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos	Reduzido
Tipo 2	Fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão	Moderado
Tipo 3	Oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal	Elevado

Qualquer atividade industrial é capaz de gerar uma carga contaminante no subsolo em decorrência da emissão de efluentes líquidos, do despejo inadequado de resíduos sólidos (Pankow *et al.*, 1984; Bernardes *et al.*, 1991) e de materiais indesejáveis, além de acidentes envolvendo vazamentos de produtos químicos perigosos (SAX, 1984).

O manuseio e lançamento de líquidos efluentes é um aspecto da atividade industrial que merece atenção detalhada com respeito à contaminação da água subterrânea. Nas indústrias localizadas próximas de cursos de água superficiais, a descarga direta de efluentes líquidos industriais é uma prática comum; e há casos em que a disposição dos efluentes é feita por infiltração no solo. Diferentemente dos casos em que a indústria realiza o tratamento sistemático dos efluentes, tais práticas sempre representarão um perigo direto ou indireto à qualidade da água subterrânea. Além disso, nos locais onde a armazenagem e o tratamento de efluentes são realizados em lagoas não impermeabilizadas, estes também representam um perigo significativo de contaminação da água subterrânea (FOSTER *et al.*, 2006).

Os poços de combustíveis foram considerados de elevado potencial de contaminação porque os hidrocarbonetos são extremamente danosos ao meio ambiente, e mais ainda nos casos em que os reservatórios estão localizados em subsuperfície, ficando mais próximos a zona saturada do aquífero. As principais fontes de poluição do solo e da água subterrânea são tanques corroídos, e há uma forte correlação entre a incidência e o tamanho dos vazamentos e a idade dos tanques instalados (KOSTECKI & CALABRESE, 1989; CHEREMISINOFF, 1992).

O elevado potencial de contaminação também foi atribuído aos lixões e à disposição de esgoto doméstico no solo devido a grande diversidade de compostos contaminantes que os compõem. No caso dos lixões, o potencial de contaminação aumenta muito no período chuvoso, já que aumenta a diluição

do lixiviado e a infiltração. Essa medida de precaução de considerar carga elevada não é considerada excessiva, pois pequenos volumes de substâncias tóxicas (como compostos orgânicos sintéticos) podem causar grande deterioração na qualidade da água subterrânea (Mackey e Cherry, 1996). Já os aterros controlados foram considerados de moderada carga poluidora, considerando uma capacidade de carga poluidora menor que os lixões e os aterros sanitários de reduzida carga, já que diminui o risco de contaminação das águas subterrâneas quando executado adequadamente.

O cultivo agrícola do solo exerce importante influência sobre a qualidade da recarga da água subterrânea. Algumas práticas provocam grave contaminação difusa, principalmente por nutrientes (sobretudo nitratos) e agrotóxicos. Outros nutrientes essenciais para a planta, como potássio e fosfato, tendem a ficar retidos no solo e sua lixiviação para a água subterrânea não é muito significativa (FOSTER *et al.*, 2006).

Ainda segundo Foster *et al.* (2006), os tipos de atividade agrícola responsáveis pelos casos mais graves de contaminação difusa da água subterrânea são aqueles relacionados com áreas extensas de monocultura. Os cultivos rotativos mais tradicionais, o pasto extensivo e os sistemas de agricultura ecológica normalmente apresentam menos probabilidade de carga contaminante no subsolo. O cultivo de produtos perenes também produz menos perdas por lixiviação do que nos locais onde se pratica a agricultura sazonal, pois há menos perturbação e aeração do solo e a plantação tem uma necessidade mais contínua de nutrientes. Quando se renovam os cultivos perenes e o solo precisa ser arado podem ocorrer maior liberação e lixiviação de nutrientes.

Foi considerado de potencial elevado para a agricultura, que tem seu ápice no período chuvoso, pois a carga hidráulica transporta os contaminantes lançados nesse período e aqueles remanescentes no solo para a zona saturada do aquífero.

Os cemitérios foram considerados como de potencial moderado de contaminação, tendo seu ápice no período de chuvas. Em geral, essa prática de enterrar cadáveres humanos e também de animais gera uma carga contaminante microbiológica relativamente pequena e restrita a uma certa área, e que ainda pode ser reduzida com a utilização de túmulos impermeáveis e/ou ataúdes resistentes à corrosão. A situação, no entanto, é diferente quando grande número de animais mortos são rapidamente enterrados após uma epidemia, por exemplo, já que as covas, cavadas às pressas, são usadas sem nenhuma precaução ou consideração especial (FOSTER *et al.*, 2006).

A Figura 8.4 apresenta as fontes de contaminação da área de estudo consideradas e classificadas de acordo com o índice POSH.

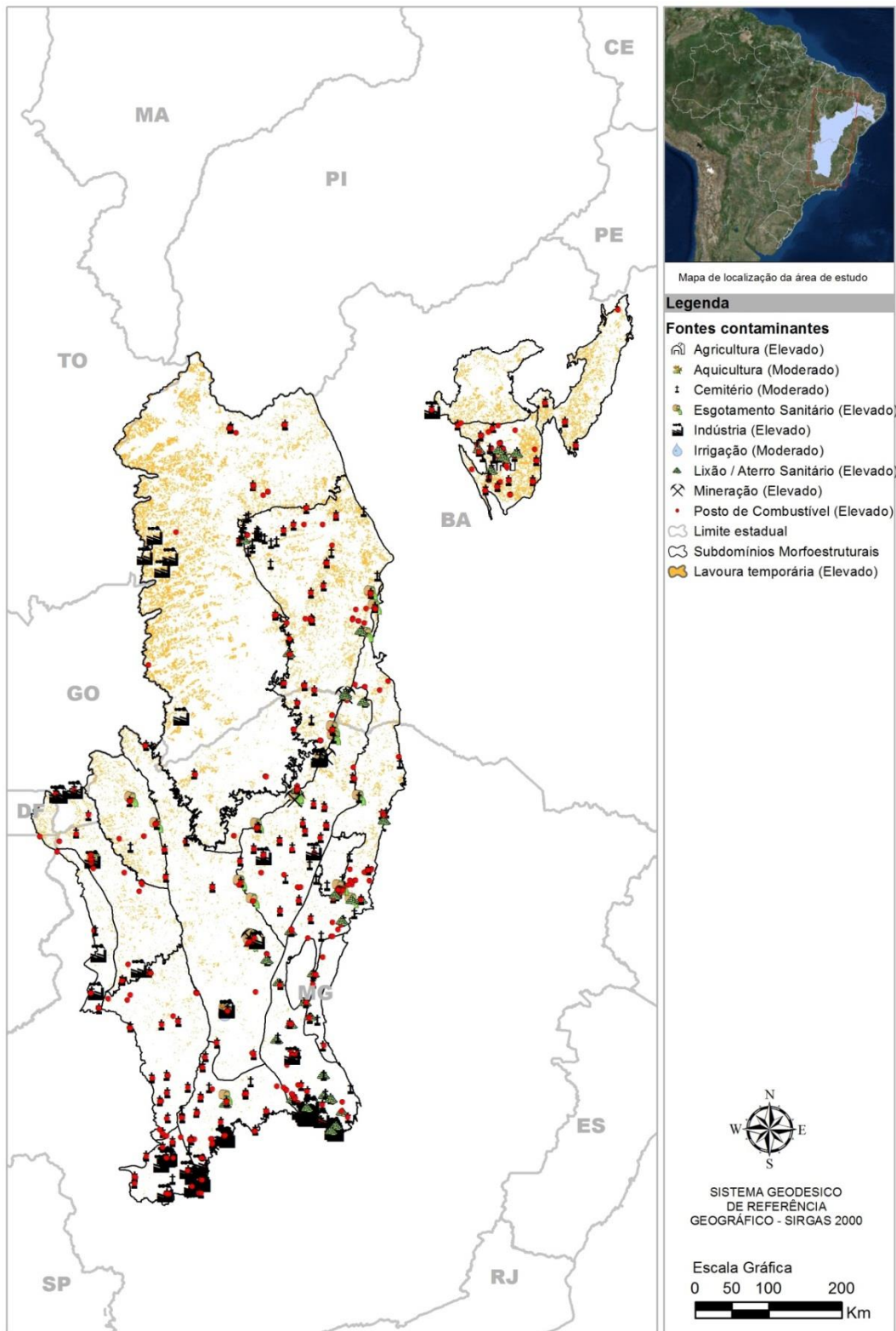


Figura 8.4: Distribuição das cargas contaminantes no Domínio IV com classificação POSH.

8.2.2 Avaliação do perigo de contaminação dos aquíferos

O perigo de contaminação de um aquífero pode ser determinado considerando a interação entre a carga contaminante a ser aplicada ao subsolo como resultado de atividades humanas e a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, o que depende das características naturais dos estratos que o separam da superfície do solo.

A avaliação do perigo (Figura 8.5) envolve, portanto, o exame dessa interação (Foster, 1987) por meio da sobreposição dos resultados do cadastro de carga contaminante de subsolo ao mapa de vulnerabilidade do aquífero (Figura 8.3).

Os casos mais preocupantes são aqueles em que as atividades capazes de gerar elevada carga contaminante se desenvolvem, ou estão planejadas para se desenvolverem, numa área de alta ou extrema vulnerabilidade do aquífero.

Portanto, o perigo à contaminação na área de estudo foi definido a partir da classificação proposta por Foster *et al.* (2002), conforme (Tabela 8.5)

Tabela 8.5 – Classificação do perigo à contaminação.

PERIGO À CONTAMINAÇÃO		EPIK adaptado		
		Baixa	Média	Alta
POSH	Reduzido	MUITO BAIXO	BAIXO	BAIXO
	Moderado	BAIXO	MODERADO	ALTO
	Elevado	MODERADO	ALTO	EXTREMO

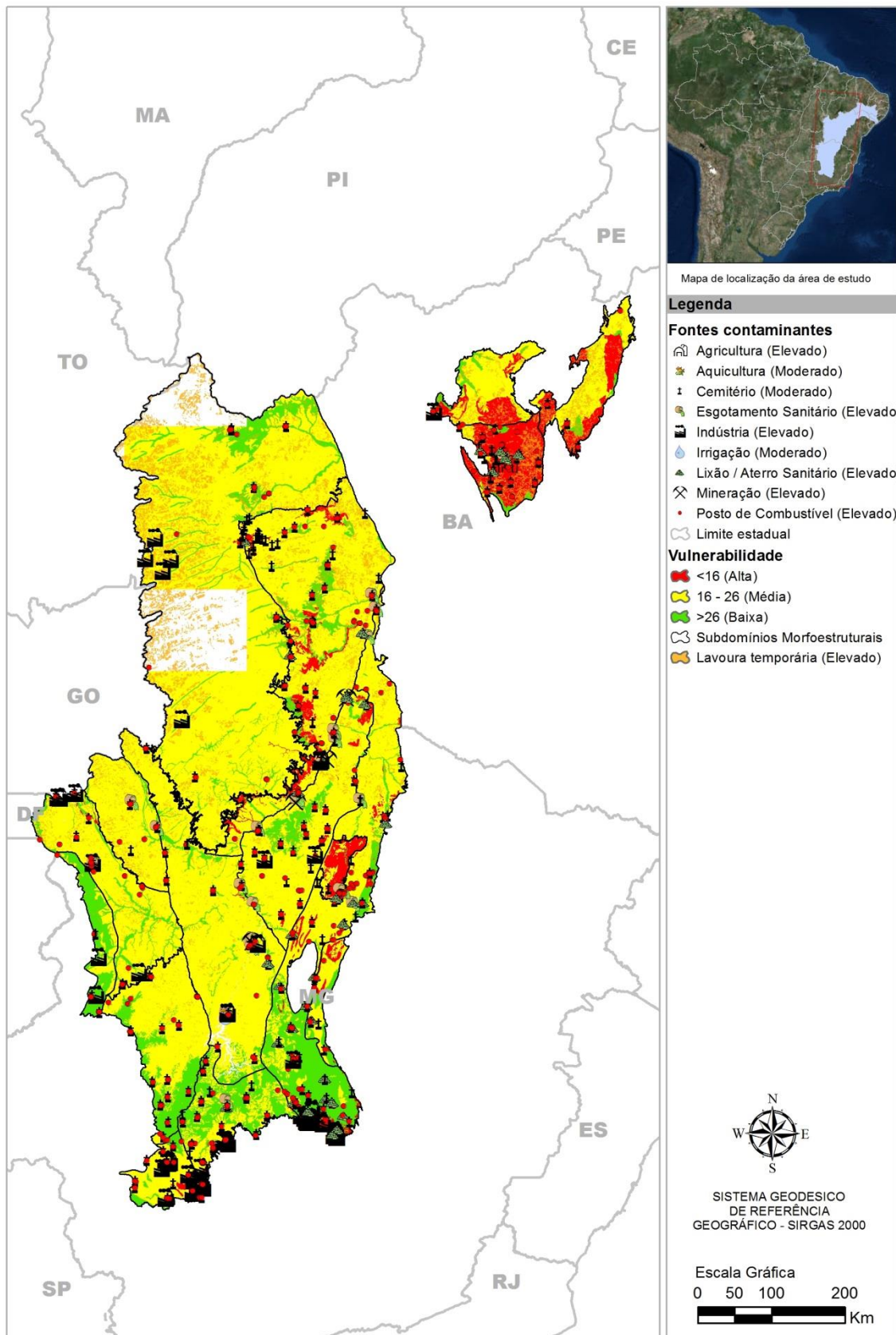


Figura 8.5: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação.

9 Referências Bibliográficas

- Alkmim F.F.; Brito Neves B. B.; Alves J. A. C., 1993. Arcabouço Tectônico Do Cráton Do São Francisco - Uma Revisão. In: J.M. Dominguez & A. Misi (Eds.) O Cráton Do São Francisco. Reunião Preparatória Do II Simpósio Sobre O Cráton Do São Francisco. Salvador, SBG/ Núcleo BA/SE/SGM/Cnpq, P. 45-62.
- Alkmim F.F.; Chemale Jr, F.; Endo, I., 1996. A Deformação Das Coberturas Proterozoicas Do Cráton Do São Francisco E Seu Significado Tectônico. Revista Da Escola De Minas 49(1): 22-38.
- Alkmim, F. F. & Martins-Neto, M. A. 2001. A Bacia Intracratônica Do São Francisco: Arcabouço Estrutural E Cenários Evolutivos. In: Pinto, C. P. & Martinsneto, M. A Bacia Do São Francisco Geologia E Recursos Naturais. Sbg, Belo Horizonte, 9-30.
- Alkmim, F.F.; Soares, A.C.P.; Noce, C.M.; Cruz, S.C.P., 2007. Sobre A Evolução Tectônica Do Orógeno Araçuai-Congo Ocidental. GEONOMOS 15(1): 25 – 43.
- Allen, J.R.L., 1870. Notes on The Geological Character of the Country Between Xique-Xique on the Rio São Francisco And Bahia, Brazil. In: Hartt's Geology and Physical Geography of Brazil, P. 303-308.
- Almeida Abreu, P.A., 1993. A Evolução Geodinâmica Da Serra Do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil. Tese De Doutorado Apresentada À Univ. Freiburg, 150 Pp.
- Amorim Junior, V. & Lima, O.A.L., 2007. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas (BA) Usando Resistividade e Polarização Induzida. Revista Brasileira de Geofísica. 25(2): 117-129.
- Amorim Junior, V., 2003. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas Usando Resistividade. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 82 p. 2003.
- ANA - Agência Nacional De Águas, 2017. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada - Nota Técnica: Investigação Geofísica na Região dos Sistemas Aquíferos Urucuia (SAU) e Areado (SAA).
- ANA - Agência Nacional De Águas. Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras – Edição Especial. Brasília – DF, 2015.
- ANA - Agência Nacional De Águas. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade no Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada. I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Juazeiro – BA, 2016.

- ANA - Agência Nacional De Águas. Interação Água Superficial e Subterrânea no Sistema Aquífero Urucuia. WORKSHOP - Gestão Integrada de Recursos Hídricos Superficiais E Subterrâneos, 2014.
- Andrade, J.B.M. & Cascaes, O.S.F., 1990. Panorama Hidrogeológico Do Grupo Bambuí No Oeste Da Bahia. In: (Ver Notas) Porto Alegre, ABAS, P. 50-57.
- Auler, A.S.; Smart, P.L.; Wang, X.; Cristalli, P.; Edwards, R.L., 2003. O Calcário Caatinga E Os Carbonatos Secundários Superficiais Do Norte Da Bahia: Geocronologia E Significado Paleoambiental. IX Congresso Da Associação Brasileira De Estudos Do Quaternário, Recife.
- Auler, S. & Smart, P.L., (S/Data). Toca Da Boa Vista (Campo Formoso), BA - A Maior Caverna Do Hemisfério Sul. Sigep-19.
- Babinski, M. & Kaufman, A.J., 2003. First Direct Dating of a Neoproterozoic Post-Glacial Cap Carbonate. In: South American Symposium On Isotope Geology, 4, Short Papers, Salvador, V.1, P.321-323.
- Babinski, M. 2005. A Idade Do Supergrupo São Francisco: Revisão E Implicações Nas Glaciações Neoproterozoicas. In: Simpósio Sobre O Cráton Do São Francisco, 3, Short Papers, Salvador, P.135-138.
- Banner, J.L., 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 65, 141 – 194.
- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P.; Marinho, M.M., 2003. O Cráton Do São Francisco Na Bahia: Uma Síntese. *Revista Brasileira De Geociências* 33(1):3-6.
- Barleto, E. A.; Souza, H. N. De; Lessa, G. Anais Do XXIX Congresso Brasileiro De Espeleologia. Ouro Preto, Minas Gerais. 2007, 8 Pags.
- Beraldo, V.J., 2006. Avaliação Macroscópica Das Feições Cársticas Da Formação Salitre Na Folha Irecê (SC.24-Y-C-I) Como Reservatórios Para Água Subterrânea. XIV Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, ABAS, São Paulo.
- Bernardes, J.R.C.; Hirata, R.J.; Mendes, J.; Cleary, R., 1991. Remedial action for an industrial open dump-proposed activities and perspectives. *Water Science and Technology* 24(11): 271–281
- Bomfim, L.F. & Pedreira, A.J., 1990. Geologia Da Chapada Diamantina Oriental, Bahia (Folha Lençóis). In: Bomfim, L.F. & Pedreira, A.J., Orgs, - Programa De Levantamentos Geológicos Básicos Do Brasil. Lençóis (Folha SD.24-V-A-V) Estado Da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM, P.25-73.
- Bomfim, L.F.C. & Gomes, R.A.A.D., 2004. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: Ideias para Discussão. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13, Cuiabá (MT).
- Branner, J.C., 1910. The Tombador Escarpment In The State Of Bahia, Brazil. *Am. J. Sci.* 30:335-343.

- Branner, J.C., 1919. Outlines of The Geology of Brazil To Accompany The Geological Map of Brazil. Bull. Geol. Soc. Amer. 30 (2): 189-338.
- Brasil/MMA, 2011. Diagnóstico Do Macrozoneamento Ecológico-Econômico Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco. Brasília.
- Brito Neves, B.B. & Silva, A.J.C.L.P., 2008. Diamictitos E “Cap Dolomites” Sturtianos Sobre O Grupo Jacobina - Araras, Norte De Campo Formoso – Bahia. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, V. 8, N. 2, P. 11-27.
- Brito Neves, B.B., 1967. Geologia Das Folhas De Upamirim E Morro Do Chapéu – BA. Relatório Técnico N. 17, SUDENE/CONESP. Recife.
- Brito Neves, B.B., 1968. A Formação Samburá Na Bahia. Boletim De Estudos SUDENE, N.4, P.7- 15.
- Brito Neves, B.B.; Santos, R.A.; Campanha, G.A.C., 2012. A Discordância Angular E Erosiva Entre Os Grupos Chapada Diamantina E Bambuí (Una) Na Folha Mirangaba-Bahia. Geol. USP, Sér. Cient., São Paulo, V. 12, N. 2, P. 9-114.
- Brito, A.A.; Cardoso, A.C.; Oliveira, C.E.S.; Oliveira, C.E.; Cunha, F.L.; Negrão, F.I.; Oliveira Filho, I.B.; Gusmão De Oliveira, R., 2013. Ação Emergencial Na Cidade De Lapão – BA - Relatório Final Integrado (Levantamento Geofísico, Levantamento Hidrogeológico, Análise De Risco). CPRM/DGM/Superintendência De Salvador.
- Brito, A.A.; Oliveira, C.E.S.; Gusmão De Oliveira, R.; Santiago, R.C., 2013. Levantamento Geofísico De Eletroresistividade Para Investigação Do Substrato Calcário De Áreas Colapsadas E De Novas Áreas Para Expansão Urbana Da Cidade De Lapão-BA. CPRM/DGM/Superintendência De Salvador.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M.; D'Alge, J. C. Introdução À Ciência Da Geoinformação. São José Dos Campos: INPE, 2001.
- Caxito, F.A.; Uhlein, A.; Dos Santos, Y.L.O.P.; Pedreira, A.J.; Faulstich, F.R.L., 2008. A Geologia Entre Macaúbas E Canatiba (Bahia) E A Evolução Do Supergrupo Espinhaço No Brasil Oriental. GEONOMOS 16(1): 11 - 20, IG/UFMG.
- CBHSF – Comitê Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco. Plano De Recursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio São Francisco – Resumo Executivo. Salvador-BA, 2004.
- Censo Demográfico 2010. Rio De Janeiro: IBGE, 2011.
- Chaves, M.L.S.C. & Brandão, P.R.G., 2004. Diamante Variedade Carbonado Na Serra Do Espinhaço (MG/BA) E Sua Enigmática Gênese. Rev. Esc. Minas Vol.57 No.1 Ouro Preto.
- Chaves, M.L.S.C.; Andrade, K.W.; Benitez, L., 2011. Geologia Integrada Das Folhas Jequitaí, Bocaiúva E Montes Claros (1:100.000), Norte De Minas Gerais. GEONOMOS, 19(2), 1-7, IG/UFMG.

- Chaves, M.L.S.C.; Benitez, L.; Andrade, K.W.; Queiroga, G.N., 2007. Estratigrafia E Evolução Geomorfológica Do Grupo Bambuí Na Região De Morro Da Garça (MG). *GEONOMOS* 15(2): 43 - 52, 43.
- Chiavegatto, J.R.S., 1992. Análise Estratigráfica Das Sequências Tempestíticas Da Formação Três Marias (Proterozoico Superior), Na Porção Meridional Da Bacia Do São Francisco. Dissertação De Mestrado Apresentada Ao Departamento De Geologia, Escola De Minas, Universidade Federal De Ouro Preto, 216p.
- Cheremisinoff, P.N., 1992. Compressors and Fans Vol. 2: Process and Pollution Control Equipment. Prentice Hall PTR.
- Costa, D.A., 2011. Controle lito-estrutural e estratigráfico na hidrogeoquímica e nas concentrações de fluoreto no sistema aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí, Norte de Minas Gerais. Dissertação de mestrado apresentada à UFMG.
- CPRM, 2003. Mapa Geológico Do Brasil. Escala 1:2.500.000. CD-ROM.
- CPRM/CBPM, 2003. Mapa Geológico Do Estado Da Bahia – Escala 1:1.000.000. Versão 1.1
- CPRM/COMIG, 2003. Mapa Geológico Do Estado De Minas Gerais, 1:1.000.000.
- Cruz, S.C.P. & Alkmim, F.F., 2007. A História De Inversão Do Aulacógeno Do Paramirim Contada Pela Sinclinal De Ituaçu, Extremo Sul Da Chapada Diamantina (BA). *Revista Brasileira De Geociências*, 37(4 - Suplemento): 92-110.
- Cruz, S.C.P.; Dias, V.M.; Alkmim, F.F., 2007. A Interação Tectônica Embasamento/Cobertura Em Aulacógenos Invertidos: Um Exemplo Da Chapada Diamantina Ocidental. *Revista Brasileira De Geociências*, 37(4 - Suplemento): 111-127.
- Danderfer, A., 2000. Geologia Sedimentar E Evolução Tectônica Do Espinhaço Setentrional, Estado Da Bahia. Tese De Doutorado, Instituto De Geociências, Universidade De Brasília, 494 P.
- Dardenne, M.A., 1978. Síntese Sobre A Estratigrafia Do Grupo Bambuí No Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro De Geologia, 30, Recife, Anais, V. 2, P. 597-610.
- Dardenne, M.A., 1981. Os Grupos Paranoá E Bambuí Na Faixa Dobrada Brasília. An. I Simp. Sobre O Cráton Do São Francisco E Suas Faixas Marginais. SBG - Núcleo BA, CPM/SME: 140-157.
- Derby, O.A., 1905. Notas Geológicas Sobre O Estado Da Bahia. Secr. Agric. Viação Ind. Obr. Publ. Boletim, 7:12-31.
- Derby, O.A., 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. *J. Geol.*, 14:374-401
- Doerfliger, N. & Zwahlen, F., 1998. Practical guide, groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 56 pp.

- DNPM/CPRM, 1977. Projeto Hidrogeologia Do Nordeste De Minas Gerais E Sul Da Bahia. – Relatório Técnico, 8 Volumes, Belo Horizonte.
- Dossin, I.A.; Dossin, T.M., 1995. Supergrupo Espinhaço: Modelo De Evolução Geodinâmica. GEONOMOS, Belo Horizonte, V. 3, N. 1, P. 19-26.
- Dossin, I.A.; Dossin, T.M.; Chaves, M.L.S.C., 1990. Compartimentação Estratigráfica Do Supergrupo Espinhaço Em Minas Gerais - Os Grupos Diamantina E Conselheiro Mata. Revista Brasileira De Geociências 20(1-4):178-186.
- Drumond, J.B.; Raposo, F.O.; Sperling, E.Von., 1980. Relatório Final. In: Projeto Porteirinha - Monte Azul, Escala 1:50.000. DNPM/CPRM, V.1, 559 P. Belo Horizonte.
- Ecology Brasil. Projeto De Integração Do Rio São Francisco Com Bacias Hidrográficas Do Nordeste Setentrional – Relatório De Impacto Ambiental. MI -Ministério Da Integração Nacional. Julho, 2004.
- Egydio-Silva, M.E., (1987). O Sistema De Dobramentos Rio Preto E Suas Relações Com O Cráton Do São Francisco. São Paulo, 141p. (Tese De Doutorado, Instituto De Geociências/USP)
- EMBRAPA. Subsídios Técnicos Para A Indicação Geográfica De Procedência Do Vale Do Submédio São Francisco: Uva De Mesa E Manga. PETROLINA, PE: [S.N.].
- Faria, J. A., 1997. Levantamento De Dados Para Avaliação Das Emissões De Gases De Efeito Estufa Devido Às Mudanças Nos Estoques De florestas. ABRACAVE, Belo Horizonte.
- Feitosa, E.C., 1975. Reconhecimento Geofísico Por Eletrorresistividade Da Faixa Marginal Do Grupo Bambuí Na Região De Lages Do Batata/Morro Do Chapéu/Seabra – Bahia (Área D Do Contrato CONESP/OESA). Relatório Inédito.
- Feitosa, E.C., 1993. Água Subterrânea Na Chapada Do Araripe Entre Araripina E Feitoria/PE: Investigação Preliminar. Volume 2 – Geofísica. ATEPE/LABHID – INAD, Recife.
- Feitosa, E.C., 2004. O Aquífero Jandaíra No Município De Baraúna/RN – Atualização Dos Conhecimentos. ANA/Próágua Semiárido/SERHID RN – FADE/LABHID/UFPE. Recife, Relatório Inédito. (Zoneamento dos Calcários Aquíferos e Mapeamento das Áreas de Maior Índice de Carstificação Através do Método Geofísico de Eletrorresistividade).
- Feitosa, E.C., 2004. O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix – Município De Quixeré – Ceará: Estudo Por Eletrorresistividade Da Área Do Bessa. LABHID-FADE-UFPE/Delmonte Fresh Produce Brasil Ltda, Recife, Relatório Inédito.
- Feitosa, E.C., 2005. Bacia do Rio do Peixe - Estudo Geofísico por Eletrorresistividade. Relatório Final. Contrato CPRM/UFPE No 087/PR/05, LABHID- UFPE/FADE.

- Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Coord.), 2008. Hidrogeologia: Conceitos E Aplicações. 2ª Ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE.
- Figueiredo, F.T., 2008. Fácies Sedimentares E Proveniência Da Formação Bebedouro, Neoproterozoico (BA). Dissertação De Mestrado Apresentada Ao IG/USP.
- Fragoso, D.G.C.; Reis, H.L.S.; Kuchenbecker, M., 2008. Mapeamento Geológico Da Região De Irecê-Lapão (BA): Registros De Uma Rampa Carbonática Neoproterozoica. Trabalho De Graduação. Universidade Federal De Minas Gerais. 109p
- Fragoso, D.G.C.; Uhlein, A.; Sanglard, J.C.D.; Suckau, G.L.; Guerzoni, H.T.G.; Faria, P.H., 2011. Geologia Dos Grupos Bambuí, Areado E Mata Da Corda Na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: Registro Deposicional Do Neoproterozoico Ao Neocretáceo Da Bacia Do São Francisco. GEONOMOS 19(1): 28 – 38, IGC/UFMG.
- Frantz, L.C., 2005. Avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero Guarani no perímetro urbano da cidade de Sant'ana do Livramento – RS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Fundação Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE. Manual Técnico Da Vegetação Brasileira. 1ª Edição. Rio De Janeiro, 1992.
- Gaspar, M.T.P., 2006. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional E Propostas De Gestão. Tese De Doutorado Apresentada Ao Instituto De Geociências/UNB.
- Gaspar, M.T.P.; Campos, J.E.G.; Moraes, R.A.V., 2012. Determinação das Espessuras do Sistema Aquífero Urucuia a Partir de Estudo Geofísico. Revista Brasileira de Geociências, 42 (Supl 1): 154-166.
- GDF/SEDUMA, 2010. Zoneamento Ecológico-Econômico Do DF: Subproduto 3.1 – Relatório Do Meio Físico E Biótico.
- Ghignone, J.I., 1979. Geologia dos Sedimentos Fanerozoicos do Estado da Bahia. In: Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Basicos, v. 1, cap. 3, SME/COM, Salvador, BA.
- Gomes, R.A.A.; Motta, A.C., 1980. Projeto Levantamento Gravimétrico do Estado da Bahia: Relatório Final. Salvador: CPRM, 5 V. Convênio CPRM-DNPM.
- Gosselin, D.C.; Harvey, F.E.; Frost, C.; Stotler, R.; Macfarlane, P.A., 2004. Strontium isotope geochemistry of groundwater in the central part of the Dakota (Great Plains) Aquifer, U.S.A. Applied Geochemistry 19, 359–377.
- Gradstein, F.M.; Ogg, J.G.; Smith, A.G., 2005. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge University Press, New York, USA.
- Grossi Sad, J.H. & Quade, H., 1985. Revisão estratigráfica do Grupo Bambuí (Bloco Oriental), em Minas Gerais. In: Anais Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 3, Belo Horizonte, SBG-MG, p.68-83.

- Guimarães, J.T. & Pedreira, A.J., 1990. Geologia Da Chapada Diamantina Oriental, Bahia. (Folha Utinga). In: Guimarães, J.T. & Pedreira, A.J., Orgs. - Programa De Levantamentos Geológicos Básicos Do Brasil. Utinga (Folha SD.24-V-A-II) Estado Da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM P.19-92.
- Guimarães, J.T., 1996. A Formação Bebedouro No Estado Da Bahia: Faciologia, Estratigrafia E Ambientes De Sedimentação. Dissertação De Mestrado Apresentada Ao Curso De Pós-Graduação Em Geologia Da UFBA.
- Guimarães, M.L.V.; Crocco-Rodrigues, F.A.; Abreu, F.R.; Oliveira, O.A.B.; Greco, F.M., 1993. Geologia Do Bloco Itacambira – Monte Azul Entre Barroco E Porteirinha (MG). In: Anais Do VII Simpósio De Geologia De Minas Gerais, SBG Núcleo MG, Bol. 12: 74-78.
- HIDROVIA Hidrogeologia E Meio Ambiente Ltda, 2012. Recursos Hídricos Subterrâneos - Subsídios Para Delimitação Das Zonas De Contribuição Hídrica Para O Sistema Cárstico Do Rio João Rodrigues – SCRJR. São Desidério/BA. Elaborado para O Instituto EKOS.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Atlas De Saneamento, 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Base Cartográfica Contínua Do Brasil, Ao Milionésimo (1:1.000.000) (Versão 4.0). Brasil, 2014. Disponível Em: <Ftp://Geoftp.Ibge.Gov.Br/Mapeamento_Sistematico/Base_Continua_Ao_Milionesimo/>
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Base Cartográfica Contínua Do Brasil Na Escala 1:250.000 (Versão 1.0). Brasil, 2013. Escala 1.250.000. Disponível Em: <Ftp://Geoftp.Ibge.Gov.Br/Mapeamento_Sistematico/Base_Vetorial_Continua_Escala_250mil/Hidrografia.Zip> E <Ftp://Geoftp.Ibge.Gov.Br/Mapeamento_Sistematico/Base_Vetorial_Continua_Escala_250mil/Hidrografia_2.Zip>.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Manual Técnico De Uso Da Terra. 3ª Edição. Rio De Janeiro, 2013.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Manual Técnico Da Vegetação Brasileira. 2ª Edição. Rio De Janeiro, 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Manual Técnico De Pedologia. 3ª Edição. Rio De Janeiro, 2015.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Mapa Temático - Mapa De Vegetação Do Brasil. Brasil, 2004. Escala: 1:5.000.000. Disponível Em: <Ftp://Geoftp.Ibge.Gov.Br/Mapas_Tematicos/Mapas_Murais/Shapes/Vegetacao/>. Acesso Em: 19 Agosto de 2014.
- IGAM, 2003. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

- Iglesias, M. & Uhlein, A., 2008. Estratigrafia Do Grupo Bambuí Na Serra Do Jaíba, Norte De Minas Gerais. GEONOMOS 16(1): 21 - 27, 20. UFMG, Belo Horizonte.
- Iglesias, M. & Uhlein, A., 2009. Estratigrafia Do Grupo Bambuí E Coberturas Fanerozoicas No Vale Do Rio São Francisco, Norte De Minas Gerais. Rev. Bras. Geociênc. V.39 N.2, 256-266, São Paulo.
- Iglesias, M., 2007. Estratigrafia E Tectônica Do Grupo Bambuí No Norte Do Estado De Minas Gerais. Dissertação De Mestrado Apresentada Ao Instituto De Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 121p.
- Inda, H.A.V. & Barbosa, J.F., 1978. Texto Explicativo Para O Mapa Geológico Do Estado Da Bahia, Escala 1:1.000.000. COM, Salvador.
- INMET – Instituto Nacional De Meteorologia. Normais Climatológicas Do Brasil, 1961-1990. Disponíveis Em: <[Http://Www.Inmet.Gov.Br/Portal/Index.Php?R=Clima/Normaisclimatologicas](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?R=Clima/Normaisclimatologicas)>
- Karfunkel B. & Karfunkel J. 1976. Estudos Petro-Faciológicos Do Grupo Macaúbas Na Porção Mediana Da Serra Do Espinhaço – MG. In: SBG, Congresso Brasileiro De Geologia, 29, Belo Horizonte, Anais, P.179-188
- Karmann, I. & Sanchez, L.E., 1979. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. Espeleotema (Soc. bras. Espeleol.),13: 105-67.
- Kegel, W., 1959. Estudos Geológicos Na Zona Central Da Bahia - Bol. 198 Do DGM-DNPM, Rio.
- King, L.C., 1956. A Geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Brasileira De Geografia, 18:147-265.
- Knauer, L.G., 1990. Evolução Geológica Do Precambriano Da Porção Centro Leste Da Serra Do Espinhaço Meridional E Metalogênese Associada. Dissertação De Mestrado, UNICAMP, 298p. Campinas.
- Knauer, L.G., 2007. O Supergrupo Espinhaço Em Minas Gerais: Considerações Sobre Sua Estratigrafia E Seu Arranjo Estrutural. GEONOMOS 15(1): 81 – 90.
- Knauer, L.G.; Silva, L.L.; Souza, F.B.; Silva, L.R.; Carmo, R.B., 2006. Folha Monte Azul 1:100.000 – Relatório Final. Convenio UFMG/CPRM, Programa Geologia Do Brasil, 87 Pp., Brasília.
- Kostecki, P.T. & Calabrese, E.J., 1989. Petroleum Contaminated Soils, Volume 1: Remediation Techniques; Environmental Fate Risk Assessment. Lewis Publishers, Inc., ISBN 0-87371-135-1.
- Kuchenbecker, M; Reis, H.L.S.; Fragoso, D.G.C., 2011. Caracterização Estrutural E Considerações Sobre A Evolução Tectônica Da Formação Salitre Na Porção Central Da Bacia De Irecê, Norte Do Cráton Do São Francisco (BA). GEONOMOS, 19(2), 42-49. IG/UFMG.

- Lagoeiro, L.E., 1990. Estudo da Deformação Nas Sequências Carbonáticas Do Grupo Una, Na Região De Irecê, Bahia. Dissertação De Mestrado, Escola De Minas, Universidade Federal De Ouro Preto, 105 P.
- Leal, A.S. & Brito Neves, B.B. 1968. Elementos de Estratigrafia do Médio São Francisco. In: Simpósio De Geologia Do Nordeste 4, Recife, 1968. Resumo Das Comunicações. Recife, SBG, P.17-19.
- Levantamento De Recursos Naturais. Rio De Janeiro: Projeto RADAMBRASIL, 1973.
- Lima, J.E.S., 1994. Monte Azul Folha SD.23-Z-D-II – Hidrogeologia. In: Programa Levantamentos Geológicos Básicos Do Brasil. Brasília: CPRM, 1994. 96 P.
- Lima, L.G.L.M. & Rocha, W.J.S.F., 2011. Caracterização Espectrorradiométrica Dos Litotipos Do Grupo Una Na Sub-Bacia De Una-Utinga No Estado Da Bahia. Anais XV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil. INPE P.8544.
- Lima, O.A.L., 2000. Estudos Geológicos e Geofísicos do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio do Cachorro – Oeste da Bahia. 42p. Publicação da SRH-BA e UFBA.
- Lima, O.A.L., 2007. Levantamentos Geofísicos No Aquífero Urucuia: Sub-Bacias Dos Rios Arrojado E Formoso, Bahia. Rede Cooperativa: Comportamento De Bacias Sedimentares Na Região Semi-Árida Do Nordeste Brasileiro. UFBA, Salvador, Agosto/2007.
- Lima, O.N.B., 2011. Estratigrafia Isotópica E Evolução Sedimentar Do Grupo Bambuí Na Borda Ocidental Do Cráton Do São Francisco: Implicação Tectônica E Paleo-Ambiental. Tese De Doutorado Apresentada Ao Instituto De Geociências Da Universidade De Brasília.
- Machado, N.; Schrank, A.; Abreu, F.R.; Knauer, L.G.; Almeida Abreu, P.A., 1989. Resultados Preliminares Da Geocronologia U/Pb Na Serra Do Espinhaço Meridional. V Simpósio Geol. Minas Gerais, Anais, Pp. 171-174, Belo Horizonte.
- Manual Técnico Da Vegetação Brasileira. Rio De Janeiro: IBGE, 2012.
- Martínez, M.I., 2007. Estratigrafia E Tectônica Do Grupo Bambuí No Norte Do Estado De Minas Gerais. Dissertação De Mestrado Apresentada À UFMG, Belo Horizonte.
- Martins, M.; Babinski, M.; Noce, C.M.; Queiroga, G.N.; Pedrosa Soares, A.C.; Trindade, R.; Liu, D., 2011. A Suíte Córrego Taquari No Anticlinal De Itacambira, Bacia Do Rio Macaúbas (MG): Magmatismo Básico Tardi-Ediacarano (Ca. 560 Ma) No Domínio Externo Do Orógeno Araçuaí. GEONOMOSUFMG, 19(2), 78-89.
- McNutt, R.H., 2000. Strontium isotopes. In: Environmental Tracers in subsurface hydrology. (eds. P. Cook and A.L Herczeg). Kluwer Academic, Boston, pp 234-260.

- Misi, A. & Souto, P., 1975. Controle Estratigráfico Das Mineralizações De Chumbo, Zinco, Flúor E Bário No Grupo Bambuí – Parte Leste Da Chapada De Irecê (Bahia). Revista Brasileira De Geociências, São Paulo.
- Misi, A.; Coelho, C.E.S.; Rocha; W.S.J.F.; Cunha, I.A.; Gomes, A.S.R., 2001. Metallogenic Evolution Of The Pb-Zn Deposits In The Neoproterozoic Basins of The São Francisco Cráton. In: Proterozoic Base Metal Deposits of Africa And South America.
- MMA – Ministério Do Meio Ambiente. Plano Nacional De Recursos Hídricos – Caderno Da Região Hidrográfica Do Rio São Francisco. Brasília, 2006.
- Montes, A.L.S., 1977. O Contexto Estratigráfico e Sedimentológico Da Formação Bebedouro Na Bahia: Um Possível Portador de Diamantes. Brasília, UnB, Departamento de Geociências. Dissertação de Mestrado, 110p. (Inédita).
- Moraes Neto, J.M. de; Barbosa, M.P.; Araújo, A.E. de., 2007. Efeito dos eventos ENOS e das TSM na variação pluviométrica do semi-árido paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.1, p.61-66, 2007.
- Moraes, L.J. & Guimarães D., 1930. Geologia Da Região Diamantífera Do Norte De Minas Gerais – An. Acad. Bras. Cienc., 2:153-186.
- Mourão, M.A.A., 1995. A Unidade Fosfática Da Formação Sopa Brumadinho, Supergrupo Espinhaço, Região De Conceição Do Mato Dentro, Minas Gerais. Dissertação De Mestrado Apresentada À UNB, 138p. Brasília.
- Mourão, M.A.A.; Soares, A.G.; Simões, E.J.M; Oliveira, E.L.; Brito, R.M.D.A.; Beato, D.A.C.; Viana, H.S., 2000. Caracterização Hidroquímica E Avaliação De Uso Das Águas Subterrâneas Na Microrregião De Unaí, Bacia Do São Francisco, NW De Minas Gerais - Brasil. In: 1st Joint World Congress On Groundwater, Fortaleza, CE.
- Moutinho Da Costa L.A; Portela A.C.P; Marchetto C.M.L; Santos E.L; Meneguesso G; Stein J.H; Batista M.B; Mossmann R & Silva W.G. 1976. Projeto Leste do Tocantins/Oeste do Rio São Francisco - LETOS. DNPM/CPRM/PROSPEC, Rel. Final Integrado, Rio de Janeiro, 270 pp.
- Nunes, A. De B., Lima, R. F. Da F., Negreiros B. Filho, C. *Et Al.* Geologia. In: Brasil. Departamento Nacional Da Produção Mineral. Projeto Radam. Folhas SC.23 Rio São Francisco E SC.24 Aracaju. Rio De Janeiro, 1973. (Levantamento De Recursos Naturais, 1)
- Oliveira, A. M. Projeto De Gerenciamento Integrado Das Atividades Desenvolvidas Em Terra Na Bacia Do São Francisco: Subprojeto1.1.A – Estudo Hidrodinâmico-Sedimentológico Do Baixo São Francisco, Estuário E Zona Costeira Adjacente-AL/SE. UFAL, Maceió, 2003.
- Oliveira, A.I. & Leonardos, O.H., 1940. Geologia Do Brasil. Com. Bras. Centenários. Portugal.
- Oliveira, A.I. & Leonardos, O.H., 1943. Geologia Do Brasil. Rio De Janeiro: Imprensa Nacional, 783p.

- Pankow, J.F.; Isabelle, L.M.; Hewetson, J.P.; Cherry, J.A., 1984. A Syringe and Cartridge Method for Down-Hole Sampling for Trace Organics in Ground Water. Wiley Online Library.
- Pedreira Da Silva, A.J.C.L., 1994. O Supergrupo Espinhaço Na Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia E Tectônica. Tese De Doutorado Apresentada Ao IG/USP, São Paulo.
- Pedreira, A.J. & Mascarenhas, J.F., 1974. A Sequência Estratigráfica Da Chapada Diamantina NE, Bahia, Brasil. In: Congresso Brasileiro De Geologia 28 , Anais. Porto Alegre, SBG, V.4.P.19-26.
- Pedreira, A.J.; Filho, V.M.C.; Monteiro, M.D.; Carvalho, M.P.; Souza, W.S.T., 1993. Geologia E Potencialidade Para Mineralizações De Cobre, Chumbo, Zinco E Prata Da Borda Norte Da Chapada Diamantina, Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 1, Salvador.
- Pedreira, A.J.; Souza, S.L.; Brito, P.C.R.; Silva, R.W.S., 1993. Estratigrafia, Sedimentologia E Recursos Minerais Da Formação Salitre Na Bacia De Irecê, Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 2, Salvador.
- Pedrosa Soares, A.C., 1995. Potencial Aurífero Do Vale Do Araçuaí, Minas Gerais: História Da Exploração, Geologia E Controle Tectono-Metamórfico. Tese De Doutorado, IG-Unb, 177 P.
- Pedrosa Soares, A.C., 1996. O Setor Setentrional Da Faixa Araçuaí. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 39, SBG, Excursão E-12, P. 13-49, Salvador.
- Pedrosa Soares, A.C.; Noce, C.M.; Vidal, P.; Monteiro, R.L.B.P.; Leonardos, O.H., 1992. Toward A New Tectonic Model For The Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) – West Congolian (SW Africa) Belt. J. South Am. Earth Sci. 6: 33-47.
- Pedrosa Soares, A.C.; Noce, C.M.; Wiedmann, C.M.; Pinto, C.P., 2001. The Araçuaí – West Congo Orogen In Brazil: An Overview Of A Confined Orogen Formed During Gondwanaland Assembly. Precambrian Research 110: 307 – 323.
- Pedrosa Soares, A.C.; Vidal, P.; Leonardos, O.H.; Brito Neves, B.B., 1998. Neoproterozoic Oceanic Remnants In Eastern Brazil: Further Evidence And Refutation Of An Exclusively Ensialic Evolution For The Araçuaí – West Congo Orogen. Geology 26: 519 – 522.
- Pflug, R. & Renger, F., 1973. Estratigrafia E Evolução Geológica Da Margem Sudeste Do Cráton Sanfranciscano. An. XXVII Congresso Bras. Geol., Aracaju, 2:5-19.
- Pflug, R., 1968. Observações Sobre A Estratigrafia Da Série Minas Na Região De Diamantina, Minas Gerais. DNPM/DGM, Est. 142: 1-20, Rio De Janeiro.
- Pinto, C.P. & Martins-Neto, M.A. (eds.), 2001. Bacia do São Francisco, Geologia e Recursos Naturais, Belo Horizonte. S.B.G.-MG, 349 p.9-30.
- Pires, M.B.O., 2001. Fluorose dentária endêmica: revisão da literatura. Unimontes Científica, v.2, n.2, p.1- 15.

- Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. CBHSF, Módulo 1, Resumo Executivo, 2004.
- Porto Lira, H.M., 2001. O Efeito Elétrico Das Argilas Nos Arenitos - Contribuição Ao Estudo Da Correlação Resistência Transversal X Transmissividade Hidráulica. Dissertação De Mestrado Apresentada À UFPE.
- Ramos, M.L.S. & Paixão, M.M.O.M, 2003. 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).
- Reis, A.D., 2012. Reconhecimento De Discordâncias Em Sistemas Aluviais Do Mesoproterozoico: Exemplo Da Formação Tombador, Chapada Diamantina, Brasil. Trabalho De Conclusão Do Curso De Geologia, Apresentado Ao IG/UFRS.
- Ribeiro, S.H.S., 2005. Caracterização Geológica E Hidrogeológica Da Bacia Do Rio Salitre, Centro-Norte Do Estado Da Bahia. Trabalho Final De Graduação Apresentado Ao Curso De Graduação Em Geologia Da UFBA.
- Romeiro Silva, P.C. & Zalán, P.V., 2005. Contribuição Da Sísmica De Reflexão Na Determinação Do Limite Oeste Do Cráton Do São Francisco. In: III Simpósio Sobre O Cráton Do São Francisco, Short Papers, P. 44-47.
- Saadi, A., S/Data. A Geomorfologia Da Serra Do Espinhaço Em Minas Gerais E De Suas Margens. Geonomos 3(1):41-63
- Santos, E.S.M.; Silva, R.W.S.; Sampaio, E.E.S., 2012. Analysis Of The Risk Of Karst Collapse In Lapão, Bahia, Brazil. Exploration Geophysics, Published Online.
- Santos, H. G. Dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. Dos; Lumbreras, J. F.; Oliveira, J. B. De; Oliveira, V. A. De; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. De; Cunha, T. J. F. Da. Proposta De Atualização Da Segunda Edição Do Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. Embrapa Solos. Rio De Janeiro, 2009.
- Schobbenhaus Filho, C.; Campos, D.A.; Derze, G.R.; Asmus, H.E., 1984. Geologia Do Brasil: Texto Explicativo Do Mapa Geológico Do Brasil E Da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Minerais. Brasília, DNPM, 501 P.
- Schobbenhaus, C., 1972b. Geologia Da Serra Do Espinhaço Entre Porteirinha E Monte Azul, Norte De Minas Gerais. SUDENE, Recife, 19 P. (Inédito).
- Schobbenhaus, C., 1972c. Estudo Geoeconômico Preliminar Do Depósito De Ferro Do Rio Peixe Bravo, Norte De Minas Gerais. SUDENE, Recife, 36 P. (Série Geologia Econômica 8).
- Schobbenhaus, C., 1996. As Tafrogêneses Superpostas Espinhaço E Santo Onofre, Estado Da Bahia: Revisão E Novas Propostas. Revista Brasileira De Geociências, 26:265-276

- Schobbenhaus, C.E. & Kaul, P.F.T., 1971. Contribuição à Estratigrafia da Chapada Diamantina – Bahia Central. *Min. Met.* 53 (315): 116-129.
- Scholl, W.U. & Fogaça, A.C.C., 1979. Estratigrafia Da Serra Do Espinhaço Na Região De Diamantina. I Simp. Geol. Minas Gerais, Anais, Pp. 55-73, Diamantina/MG.
- Schuster, H.D.M; Silva, F.F. da; Teixeira, S.L.; Batista, L.H.G.; Freitas, W.A., 2002. Estudos Hidrogeológicos do Aquífero Urucuia no oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12, Santa Catarina, CD-ROM.
- Sgarbi, G.N.; Sgarbi, P.B.; Campos, J.E; Dardenne, M.A.; Penha, U.C, 2001. Bacia Sanfranciscana: O Registro Fanerozoico Da Bacia Do São Francisco. In: Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. (Eds.) Bacia Do São Francisco: Geologia E Recursos Naturais. Belo Horizonte, SGB-Núcleo De Minas Gerais, 93-138.
- Silva, A.B. *Et Al.* (Coord), 1981. Pesquisa E Avaliação De Recursos Hídricos Subterrâneos Em “Karsts” Por Sensores Remotos – Relatório Final. CETEC/Cnpq, Belo Horizonte/MG.
- Silva, A.B., 1984. Análise Morfoestrutural, Hidrogeológica E Hidroquímica No Estudo Do Aquífero Cárstico Do Jaíba, Norte De Minas Gerais. Tese De Doutorado Apresentada Ao IG/USP, São Paulo.
- Silva, A.B., 2006. Recursos Hídricos Subterrâneos Da Bacia Do Rio Salitre, Bahia: Uso Sustentável Na Indústria Do Mármore Bege Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 24, Salvador/BA.
- Silva, H.P. (Coordenador), 2013. Impacto Da Agricultura Nos Recursos Hídricos Subterrâneos Da Bacia Do Rio Verde/Jacaré – BA (Resumo Executivo Do Relatório Final). ANA/GEF/PNUMA/OEA/UFBA, Salvador/BA.
- Silva, R.A.; Petrarca, M.H.; Santos, R.C.; Yamamoto, I.T.; Marques, L.R.M., 2011. Monitoramento da concentração de íons fluoreto na água destinada ao consumo humano proveniente de um município com diferentes sistemas de abastecimento público / Monitoring the fluoride ions concentration in water for human consumption from a municipality with different public water supply systems. *Rev. Inst. Adolfo Lutz*; 70(2): 220-224.
- Silverman, B. W. *Density Estimation For Statistics And Data Analysis.* New York: Chapman And Hall, 1986.
- Souza, J.D. *et al*, 2002. Mapa Geológico do Estado da Bahia - Escala 1:1.000.000. In: Souza, J.D.; Melo, R.C.; Kosin, M.; Jesus, J.D.A., 2002. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: Sistema de Informações Geográficas -SIG. Salvador: CPRM. 1 CD-ROM. Programas Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Convênio de Cooperação Técnico Científica CBPM-CPRM.

- Souza, S.L.; Brito, P.C.R.; Silva, R.W.S., 1993. Estratigrafia, Sedimentologia E Recursos Minerais Da Formação Salitre Na Bacia De Irecê, Bahia. Salvador, CBPM, Série Arquivos Abertos 2: 36.
- Summerfield, M. A. Geomorphology And Global Tectonic. Inglaterra: John Willey & Sons, 2000.
- Thomaz Filho, A.; Kawashita K.; Cordani, U.G., 1998. A Origem Do Grupo Bambuí No Contexto Da Evolução Geotectônica E De Idades Radiométricas. Anais Da Academia Brasileira De Ciências, 70:527-548.
- Tschiedel, M.W., 2004. Aplicação De Estudo Geofísico Como Contribuição Ao Conhecimento Da Tectônica Da Subbacia Urucuia. Dissertação (Mestrado) - Instituto De Geociências, Universidade De Brasília, Brasília.
- Uhlein A.; Lima O.N.B.; Fantinel L.M.; Baptista, M.C., 2004. Estratigrafia E Evolução Geológica Do Grupo Bambuí, Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro De Geologia, 42, Roteiro Geológico, Excursão 2, CD-ROM, P. 30-51.
- Uhlein, A. & Quemeneur, J.J., 2000. Estrutura E Deformação Brasileira Nos Diques Máficos Da Serra Do Espinhaço Meridional. GEONOMOS 8 (2): 19-25.
- Uhlein, A., 1991. Transição Cráton-Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) No Estado De Minas Gerais. Aspectos Estratigráficos E Estruturais. Tese De Doutorado, Universidade De São Paulo, 259 P.
- Uhlein, A.; Baptista, M.C.; Seer, H.J.; Caxito, F.A.; Uhlein, G.J.; Dardenne, M.A., 2011. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional De Leque Submarino Em Bacia De Ante-País. Geonomos, 19(2), 163-172.
- Uhlein, A.; Caxito, F.A.; Sanglard, J.C.D.; Uhlein, G.J.; Suckau, G.L., 2011. Estratigrafia E Tectônica Das Faixas Neoproterozoicas Da Porção Norte Do Cráton Do São Francisco. GEONOMOS, 19(2), 8-31. IG/UFMG.
- Uhlein, A.; Dardenne, M.A.; Seer, H.J.; Moraes, L.C.; Baptista, M.C.; Noce, C.M.; Fragoso, D.G.C.; Dias, P.H.A.; Moreira, G.C., 2010. A Formação Lagoa Formosa E A Estratigrafia Do Grupo Bambuí Em Minas Gerais. In: XLV Congresso Brasileiro De Geologia, Belém. Anais Do XLV Congresso Brasileiro De Geologia.
- Uhlein, A.; Suckau, G.L.; Sanglard, J.C.D.; Caxito, F.A., 2011. Estratigrafia E Evolução Sedimentar De Diamictitos E Carbonatos Neoproterozoicos No Domínio Vaza-Barris, Faixa De Dobramentos Sergipana, Nordeste Do Brasil. GEONOMOS 19(1): 01 – 09.
- Uhlein, A.; Trompette, R.; Egydio-Silva, M.; Vauchez, A., 2007. A Glaciação Sturtiana (~750 Ma), A Estrutura Do Rifte Macaúbas-Santo Onofre E A Estratigrafia Do Grupo Macaúbas, Faixa Araçuaí. GEONOMOS, 15.
- Velásquez, L.N.M. (coord.), 2003. Origem do flúor na água subterrânea e sua relação com os casos de fluorose dental no município de São Francisco,

Minas Gerais. Relatório de Pesquisa. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 138p.

- Velásquez, L.N.M. (coord.), 2007. Estudo da tipologia das ocorrências de fluorita que ocasionam anomalias nos níveis de fluoreto da água subterrânea, e a sua relação com os casos de fluorose dental no município de São Francisco, Minas Gerais. Relatório de Pesquisa. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 148p.
- VELÁSQUEZ, L.N.M (coord.). 2009. Processos geradores de concentração anômala de fluoreto na água subterrânea em região semi-árida: estudo de caso em aquífero cárstico-fissural do Grupo Bambuí nos municípios de Verdelândia, Varzelândia e Jaíba, Minas Gerais. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 231 p..
- Villanueva, T. C. B.; Leal, L.R.B.; Zucchi, M.; Azevedo, A. E. G.; Villanueva, P.R., 2013. Caracterização Hidroquímica e Hidrogeológica do Aquífero Cárstico Salitre na Região de Irecê, Bahia. - RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 19 n.4 –Out/Dez 2014, 83-96
- Vieira, L.V., 2007. A Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí) E As Variações Paleoambientas No Final Do Proterozoico. Tese De Doutorado Apresentada Ao IG/USP, São Paulo.
- Viveiros, J.F.M., Sá, E.L., Vilela, O.V., Santos, O.M., Moreira, J.M.P., Holder-Neto, F. & Vieira, V.S. 1978. Geologia Dos Vales Dos Rios Peixe Bravo E Alto Vacaria, Norte De Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 30, Recife. SBG, Anais, V. 1, P. 243-254.

10 Anexos

Disponível apenas em meio digital



**MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE**

**GOVERNO
FEDERAL**

