



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



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



Relatório Final

Relatório Técnico Temático de Hidroquímica

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

RELATÓRIO TÉCNICO TEMÁTICO DE HIDROQUÍMICA

© 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 Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Técnico Temático de Hidroquímica / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018.
229p.
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 Rio 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 Urucuia 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

Tomo 1 – Área Piloto do rio São Desidério/BA

Tomo 2 - Área Piloto do rio do Vieira/MG

Tomo 3 - Área Piloto do riacho do Juá/BA

- Volume IV – Gestão Integrada de Recursos Hídricos

Tomo 1 – Balanço Hídrico

Tomo 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

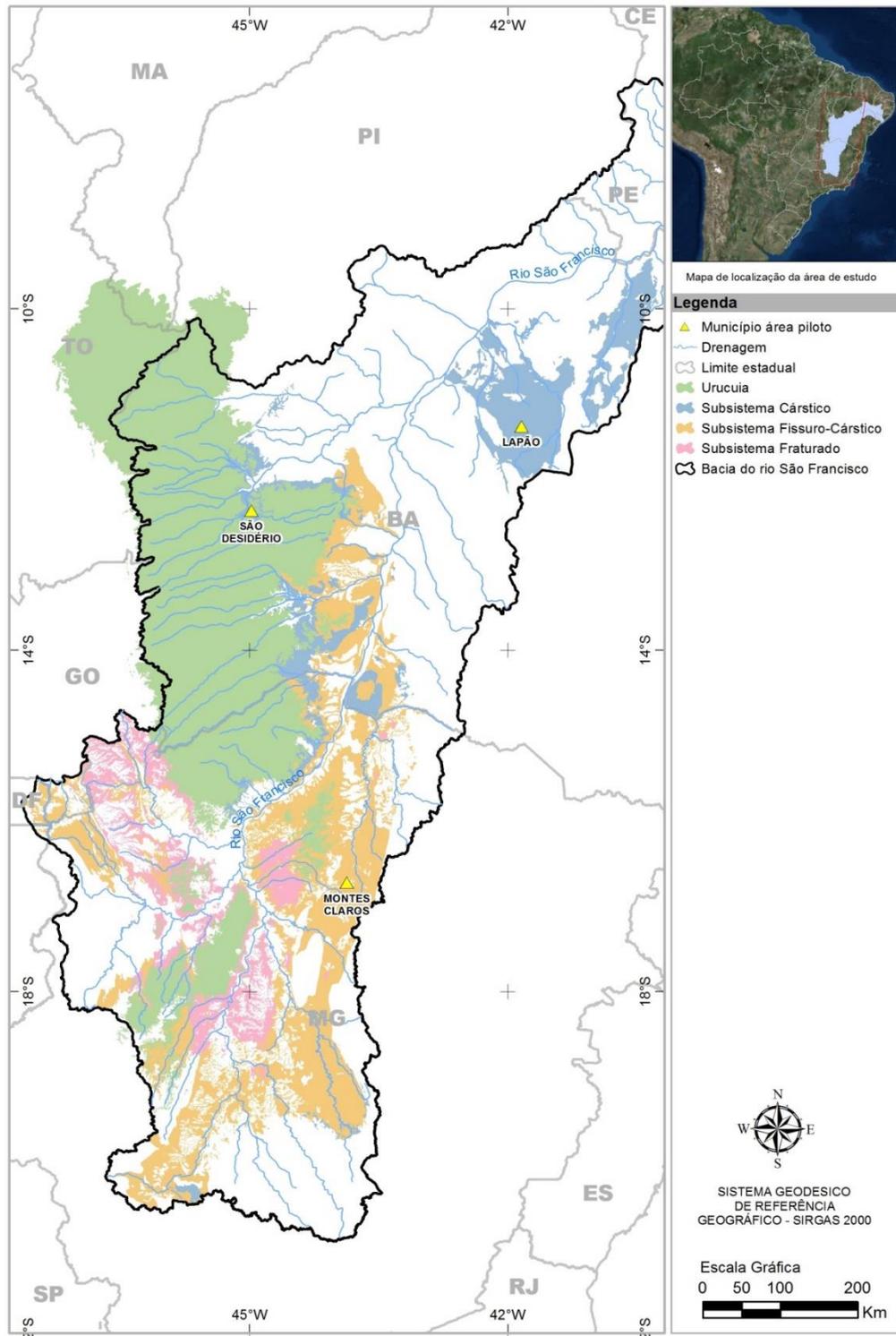


Figura 1: Área de estudo, destacando os sistemas cársticos e fissuro cársticos, e as Áreas Piloto

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 perfilação 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. Hidroquímica regional..... | 19 |
| 3. Amostragem e Análises - Primeira Campanha..... | 22 |
| 3.1 Rede de amostragem, procedimentos de coleta e métodos de análise | 22 |
| 3.2 Qualidade analítica dos dados..... | 35 |
| 3.2.1. Avaliação dos parâmetros in situ..... | 35 |
| 3.2.2. Cálculo do Balanço iônico | 44 |
| 4. Amostragem e Análises – Segunda campanha | 47 |
| 4.1 Rede de amostragem, procedimentos de coleta e métodos de análise | 47 |
| 4.2 Qualidade analítica dos dados | 60 |
| 4.2.1 Avaliação dos parâmetros in situ | 60 |
| 4.2.2. Cálculo do Balanço iônico | 64 |
| 5. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 1 - Irecê..... | 68 |
| 5.1 Estatística Descritiva..... | 71 |
| 5.2 Fácies hidroquímicas | 109 |
| 5.3 Parâmetros Específicos | 112 |
| 5.4 Qualidade das Águas para o Consumo Humano | 114 |
| 5.5 Avaliações Isotópicas | 126 |
| 5.6 Considerações Finais | 128 |
| 6. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 2 - São Desidério..... | 129 |
| 6.1 Estatística Descritiva..... | 131 |
| 6.2 - Caracterização de grupos através de diagramas Box & Whisker..... | 149 |
| 6.3 Fácies hidroquímicas | 151 |
| 6.4 Parâmetros Específicos | 155 |
| 6.5 Qualidade das Águas para o Consumo Humano | 157 |
| 6.6 Avaliações Isotópicas | 169 |
| 6.7 Considerações finais..... | 172 |
| 7. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 3 - Montes Claros | 174 |
| 7.1 Estatística Descritiva..... | 176 |
| 7.2 Fácies hidroquímicas | 203 |
| 7.3 Parâmetros Específicos | 208 |
| 7.4 Qualidade das Águas para o Consumo Humano | 211 |
| 7.5 Avaliações Isotópicas | 220 |
| 7.6 Considerações finais..... | 224 |
| 8. Referências Bibliográficas | 225 |
| 9. Anexos..... | 229 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de Irecê – BA, piloto e regional. | 28 |
| Figura 3.2– Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de Montes Claros – MG, piloto e regional. | 29 |
| Figura 3.3 – Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de São Desidério – BA, piloto e regional..... | 30 |
| Figura 3.4 – Logística de campo envolvendo a medição e anotação dos parâmetros obtidos in situ.. | 31 |
| Figura 3.5 – Utilização de sonda para medição do pH da água. | 32 |
| Figura 3.6 – Utilização de sonda para medição do ORP da água. | 32 |
| Figura 3.7 – Utilização de sonda para medição do ORP da água. | 33 |
| Figura 3.8 – Kit de coleta contendo os 4 frascos utilizados na amostragem. | 33 |
| Figura 3.9 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Irecê – BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 36 |
| Figura 3.10 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 37 |
| Figura 3.11 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 37 |
| Figura 3.12 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 38 |
| Figura 3.13 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 38 |
| Figura 3.14 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 39 |
| Figura 3.15 – Resultados de pH na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 40 |
| Figura 3.16 – Resultados de pH na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 40 |
| Figura 3.17 – Resultados de pH na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 41 |
| Figura 3.18 – Resultados de ORP na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 41 |
| Figura 3.19 – Resultados de ORP na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 42 |
| Figura 3.20 – Resultados de ORP na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 42 |
| Figura 3.21 – Resultados de Temperatura na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 43 |
| Figura 3.22 – Resultados de Temperatura na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 43 |
| Figura 3.23 – Resultados de Temperatura na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 44 |
| Figura 3.24 – Percentual de erro no cálculo do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.25 – Gráfico de representação percentual do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. | 45 |
| Figura 4.1 – Localização dos poços amostrados na segunda campanha (período úmido) na área de Irecê – BA. | 50 |
| Figura 4.3 – Localização dos poços amostrados na segunda campanha (período úmido) na área de São Desidério – BA. | 52 |
| Figura 4.4 - Bombeamento do poço C-128 (Jaíba/MG) antecedendo a coleta para determinação dos parâmetros físico-químicos, agroquímicos, BTEX, fenóis e metais..... | 53 |
| Figura 4.5 – Logística de campo envolvendo a medição dos parâmetros medidos in situ, na surgência do Rebentão dos Ferros (C-056). | 54 |
| Figura 4.6 - Sonda e eletrodos para determinação da temperatura, pH e ORP. | 54 |
| Figura 4.7 - Enchimento do frasco para determinação dos parâmetros in situ..... | 55 |
| Figura 4.8 - Inserção do eletrodo para leitura dos parâmetros in situ. | 55 |
| Figura 4.9 - Leitura do parâmetro ORP. | 56 |
| Figura 4.10 - Leitura dos parâmetros condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos. | 56 |
| Figura 4.11– Kits de coleta: (a) - frascos para determinação físico-química; (b) frasco para determinação de fenóis; (c) frasco para determinação de metais; (d) frascos para determinação de BTEX; (d) frascos para determinação dos agroquímicos; (e) frascos para determinação dos isótopos. | 57 |
| Figura 4.12 – Caixa térmica com gelo para acondicionamento e envio das amostras para o laboratório..... | 58 |
| Figura 4.13 – Coleta das amostras. | 58 |
| Figura 4.14 – Proteção dos frascos para posterior acondicionamento em caixa térmica e envio ao laboratório..... | 58 |
| Figura 4.15 - Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Irecê – BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 61 |
| Figura 4.16 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. Os parâmetros físico-químicos das amostras CS-211, CS-212, CS-213, CS-214, CS-215 e CS-216 (todas de águas superficiais) não foram analisadas em laboratório, sendo analisados apenas alguns parâmetros específicos..... | 61 |
| Figura 4.17 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. Os parâmetros físico-químicos das amostras CS-206, CS-207, CS-208 e CS-209 (todas de águas superficiais) não foram analisadas em laboratório, sendo analisados apenas alguns parâmetros específicos..... | 62 |
| Figura 4.18 - Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional..... | 63 |
| Figura 4.19 – Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 63 |
| Figura 4.20 – Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. | 64 |
| Figura 4.21 – Percentual de erro no cálculo do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. | 66 |
| Figura 4.22 – Gráfico de representação percentual do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério | 67 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.23 – Relação da condutividade elétrica medida <i>in situ</i> com os erros analíticos, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. | 68 |
| Figura 5.24 - Distribuição dos poços na área regional de Irecê. | 70 |
| Figura 5.25 – Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período seco na regional de Irecê..... | 74 |
| Figura 5.26 - Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período úmido na regional de Irecê..... | 75 |
| Figura 5.27 - Correlação entre STD e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 77 |
| Figura 5.28 - Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê. | 77 |
| Figura 5.29 - Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê. | 78 |
| Figura 5.30 - Mapa de distribuição dos valores de pH no período seco na regional de Irecê. | 80 |
| Figura 5.31 - Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê. | 81 |
| Figura 5.32 - Mapa de distribuição dos teores de cálcio no período seco na regional de Irecê..... | 83 |
| Figura 5.33 - Mapa de distribuição dos teores de cálcio no período seco na regional de Irecê..... | 84 |
| Figura 5.34 - Mapa de distribuição dos teores de bicarbonato no período seco na regional de Irecê. | 86 |
| Figura 5.35 - Mapa de distribuição dos teores de bicarbonato no período úmido na regional de Irecê. | 87 |
| Figura 5.36 - Correlação entre bicarbonato e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 88 |
| Figura 5.37 - Correlação entre bicarbonato e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 88 |
| Figura 5.38 - Mapa de distribuição dos teores de sulfato no período seco na regional de Irecê..... | 90 |
| Figura 5.39 - Mapa de distribuição dos teores de sulfato no período úmido na regional de Irecê..... | 91 |
| Figura 5.40 - Mapa de distribuição dos teores de cloreto no período seco na regional de Irecê. | 93 |
| Figura 5.41 - Mapa de distribuição dos teores de cloreto no período úmido na regional de Irecê. | 94 |
| Figura 5.42 - Correlação entre nitrato e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 95 |
| Figura 5.43 - Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período seco na regional de Irecê..... | 97 |
| Figura 5.44 - Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período úmido na regional de Irecê..... | 98 |
| Figura 5.45 - Correlação entre nitrato e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 99 |
| Figura 5.46 - Mapa de distribuição dos teores de fluoreto no período seco na regional de Irecê..... | 101 |
| Figura 5.47 - Mapa de distribuição dos teores de fluoreto no período úmido na regional de Irecê.. | 102 |
| Figura 5.48 - Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê..... | 104 |
| Figura 5.49 - Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê..... | 105 |
| Figura 5.50 - Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 106 |
| Figura 5.51 - Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 106 |
| Figura 5.52 - Correlação entre dureza e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 107 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.53 - Correlação entre dureza e sulfato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 107 |
| Figura 5.54 - Correlação entre dureza e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê..... | 108 |
| Figura 5.55 - 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 5.56 - Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 117 |
| Figura 5.57 - Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 118 |
| Figura 5.58 - Resultados analíticos para o parâmetro sódio e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 119 |
| Figura 5.59 - Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 120 |
| Figura 5.60 - Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 121 |
| Figura 5.61 - Resultados analíticos para o parâmetro fluoreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 122 |
| Figura 5.62 - Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 123 |
| Figura 5.63 - Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 124 |
| Figura 5.64 - Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 125 |
| Figura 5.65 - Relação de $\delta^{18}O$ e δ^2H das amostras..... | 127 |
| Figura 6.1 - Distribuição das amostras agrupadas no âmbito da área Regional de São Desidério. | 130 |
| Figura 6.2 – Distribuição dos teores de sólidos totais dissolvidos (STD), período seco na área regional de São Desidério..... | 134 |
| Figura 6.3 - Correlação entre STD e dureza para as águas do Bambuí aflorante nos períodos seco e úmido. | 135 |
| Figura 6.4 - Correlação entre STD e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido. | 135 |
| Figura 6.5 - Correlação entre STD e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido. | 136 |
| Figura 6.6 - Correlação entre STD e sulfato para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido. | 136 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.7 – Distribuição da dureza, no período seco, na área regional de São Desidério..... | 140 |
| Figura 6.8 - Correlação entre dureza e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido. | 141 |
| Figura 6.9 - Correlação entre dureza e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido | 141 |
| Figura 6.10 - Correlação entre dureza e sulfato para as águas do Bambuí | 142 |
| Figura 6.11 - Correlação entre STD (seco) e STD (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto..... | 144 |
| Figura 6.12 - Correlação entre bicarbonato (seco) e bicarbonato (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido. | 145 |
| Figura 6.13 - Correlação entre cálcio (seco) e cálcio (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido. | 147 |
| Figura 6.13 - Correlação entre dureza (seco) e dureza (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido. | 148 |
| Figura 6.14 - Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido. | 150 |
| * 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. | 150 |
| Figura 6.15 - Diagramas box plot representando os valores de Dureza para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido. | 151 |
| *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. | 151 |
| Figura 6.16 – Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco, na área regional de São Desidério. | 152 |
| Figura 6.17 – Diagrama de Piper das amostras coletadas no período úmido, na área regional de São Desidério. | 153 |
| Figura 6.18 – Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP | 160 |
| Figura 6.19 – Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 161 |
| Figura 6.19 – Resultados analíticos para o parâmetro sódio e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 162 |
| Figura 6.20 – Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 163 |
| Figura 6.21 – Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 164 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.22 – Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 165 |
| Figura 6.23 – Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 166 |
| Figura 6.24 – Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 167 |
| Figura 6.25 – Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. | 168 |
| Figura 6.26 - Relação de $\delta^{18}O$ e δD para o conjunto total de dados e por compartimento hidrogeológico. RMM=Reta Meteorica Global. | 170 |
| Figura 7.1 - Distribuição dos pontos de coleta de poços e águas superficiais na área regional de Montes Claros/MG. | 175 |
| Figura 7.2 - Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco. | 180 |
| Figura 7.2 - Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período chuvoso. | 181 |
| Figura 7.3 - Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período seco. | 182 |
| Figura 7.4 - Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período úmido. | 182 |
| Figura 7.5 - Correlação entre STD e dureza em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 183 |
| Figura 7.6 - Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 183 |
| Figura 7.7 - Correlação entre STD e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 184 |
| Figura 7.8 - Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 184 |
| Figura 7.9 - Distribuição dos valores de cálcio nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco. | 186 |
| Figura 7.10 - Distribuição dos valores de cálcio nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco. | 187 |
| Figura 7.11 - Correlação entre STD e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 189 |
| Figura 7.12 - Distribuição dos valores de bicarbonato nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco. | 190 |
| Figura 7.13 - Distribuição dos valores de bicarbonato nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido. | 191 |
| Figura 7.14 - Correlação entre cálcio e sulfato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 192 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.15 - Correlação entre cloreto e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 194 |
| Figura 7.16 - Correlação entre cloreto e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 194 |
| Figura 7.17 - Correlação entre cloreto (todas as amostras) e nitrato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros..... | 195 |
| Figura 7.18 - Correlação entre ferro e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 196 |
| Figura 7.19 - Correlação entre ferro e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 197 |
| Figura 7.20 - Correlação entre manganês e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 198 |
| Figura 7.21 - Correlação entre manganês e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 198 |
| Figura 7.22 - Distribuição dos valores de dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco..... | 200 |
| Figura 7.23 - Distribuição dos valores da dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido..... | 201 |
| Figura 7.24 - Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 202 |
| Figura 7.25 - Correlação entre dureza e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 202 |
| Figura 7.26 - Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros. | 203 |
| Figura 7.27 - Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Montes Claros e intervalos STD. | 205 |
| Figura 7.28 - Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período seco na área regional de Montes Claros. | 206 |
| Figura 7.29 - Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período úmido na área regional de Montes Claros. | 207 |
| Figura 7.30 - Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 213 |
| Figura 7.31 - Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 214 |
| Figura 7.32 - Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 215 |
| Figura 7.33 - Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 216 |
| Figura 7.34 - Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 217 |

| | |
|---|-----|
| Figura 7.35 - Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 218 |
| Figura 7.36 - Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP..... | 219 |
| Figura 7.37 - Relação de $\delta^{18}O$ e δ^2H das amostras..... | 221 |
| Figura 7.38 – Distribuição espacial dos isótopos estáveis na área regional de Montes Claros | 222 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 - Sumário quantitativo de amostras coletadas..... | 22 |
| Tabela 3.2 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água. | 23 |
| Tabela 3.3 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação..... | 24 |
| Tabela 3.4 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação..... | 25 |
| Tabela 3.5 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação..... | 26 |
| Tabela 3.6 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação..... | 27 |
| Tabela 3.7 - Parâmetros obtidos in situ equipamento utilizado..... | 31 |
| Tabela 3.8 - Parâmetros, frascaria utilizada e tempo máximo de análise (APHA, 2005)..... | 34 |
| Tabela 3.9 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. | 35 |
| Tabela 3.10 – Avaliação das amostras com erros entre 10 e 20% mediante aplicação da Equação 4.3. | 46 |
| Tabela 4.1 - Substituição de poços na segunda campanha de amostragem. | 47 |
| Tabela 4.2 – Pontos coletados na segunda campanha de amostragem e que não foram coletados na primeira campanha. A identificação CS refere-se a pontos de águas superficiais | 47 |
| Tabela 4.3 - Sumário quantitativo de amostras coletadas..... | 49 |
| Tabela 4.11 - Parâmetros obtidos in situ e equipamento utilizado..... | 53 |
| Tabela 4.12 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. | 59 |
| Tabela 4.13 - Classes de precisão, conforme a qualidade dos resultados. | 65 |
| Tabela 4.14 - Erro admissível de balanço iônico a partir da condutividade elétrica (Custódio e Llamas, 1983) | 67 |
| Tabela 5.15 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período seco (n=42). | 71 |
| Tabela 5.16 – Sumário estatístico das águas subterrâneas da área regional do Irecê no período úmido (n=42). | 72 |
| Tabela 5.17 - Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979) . | 78 |
| Tabela 5.18 - Classificação das águas segundo a dureza em mg/L (CaCO ₃) (Custódio & Llamas, 1983). | 109 |
| Tabela 5.19 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Irecê | 113 |
| Tabela 5.20 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo. | 114 |
| Tabela 5.21 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo. | 115 |
| Tabela 5.22 - 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. | 115 |
| Tabela 5.23 - Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria n° 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano, na área regional de Irecê. | 116 |
| Tabela 5.24 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Irecê. | 126 |
| Tabela 6.1 - Sumário estatístico das águas do Bambuí aflorante, coletadas nos períodos seco e úmido (n=40). | 131 |
| Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação | 131 |
| Tabela 6.2 – Sumário estatístico das águas do Bambuí com cobertura, coletadas no período seco e úmido (n=22)..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 6.3 - Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979) | 133 |
| Tabela 6.4 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO ₃), segundo Custódio & Llamas, 2001..... | 139 |
| Tabela 6.5 – Resultados físico-químico e químico das águas do poço Urucuia e do poço Misto, no período seco e úmido..... | 149 |
| Tabela 6.6 - Fácies hidroquímicas e STD (mg/L) das águas avaliadas na área regional de São Desidério. | 154 |
| Tabela 6.7 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L). | 155 |
| Tabela 6.8 – Pontos de coleta para determinação de agroquímicos..... | 156 |
| Tabela 6.9 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo..... | 156 |
| Tabela 6.10 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo..... | 157 |
| Tabela 6.11 - 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. | 158 |
| Tabela 6.12 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria n° 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano. | 159 |
| Tabela 6.13 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de São Desidério..... | 169 |
| Tabela 7.1 – Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período seco (n=94). | 176 |
| Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação..... | 176 |
| Tabela 7.2 - Sumário estatístico das águas do Bambuí na área regional de Montes Claros coletadas no período úmido (n=93). | 177 |
| Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação..... | 177 |
| Tabela 7.3 - Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979) | 179 |
| Tabela 7.4 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO ₃)..... | 203 |
| Tabela 7.5 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) na área regional de Montes Claros | 209 |
| Tabela 7.6 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo..... | 210 |
| Tabela 7.6 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo. | 211 |
| Tabela 7.7 - 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. | 212 |
| Tabela 7.8 – 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..... | 212 |
| Tabela 7.9 – Resultados das análises de isótopos em água na área regional de Montes Claros..... | 220 |

1. INTRODUÇÃO

Este Relatório Técnico apresenta os resultados da hidroquímica regional referente às duas campanhas de amostragem de águas desenvolvidas no âmbito do estudo de “Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos”.

Primeiramente são detalhados os procedimentos de amostragem da primeira e segunda campanha de coleta, bem como, a validação dos dados analíticos.

Em seguida, são consolidados os resultados da hidrogeoquímica das subáreas regionais de Irecê, São Desidério e Montes Claros, mediante a avaliação estatística, de fácies hidroquímicas e da caracterização isotópica. As alterações no padrão de qualidade em decorrência de atividades antrópicas são, também, consideradas no âmbito da potabilidade das águas.

2. Hidroquímica regional

Os estudos hidroquímicos da “Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos” foram elaborados 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 2.1.

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. 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)¹ e Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

¹ Os resultados de trítio apresentaram problemas analíticos e, portanto, não foi possível a sua utilização nesse estudo.

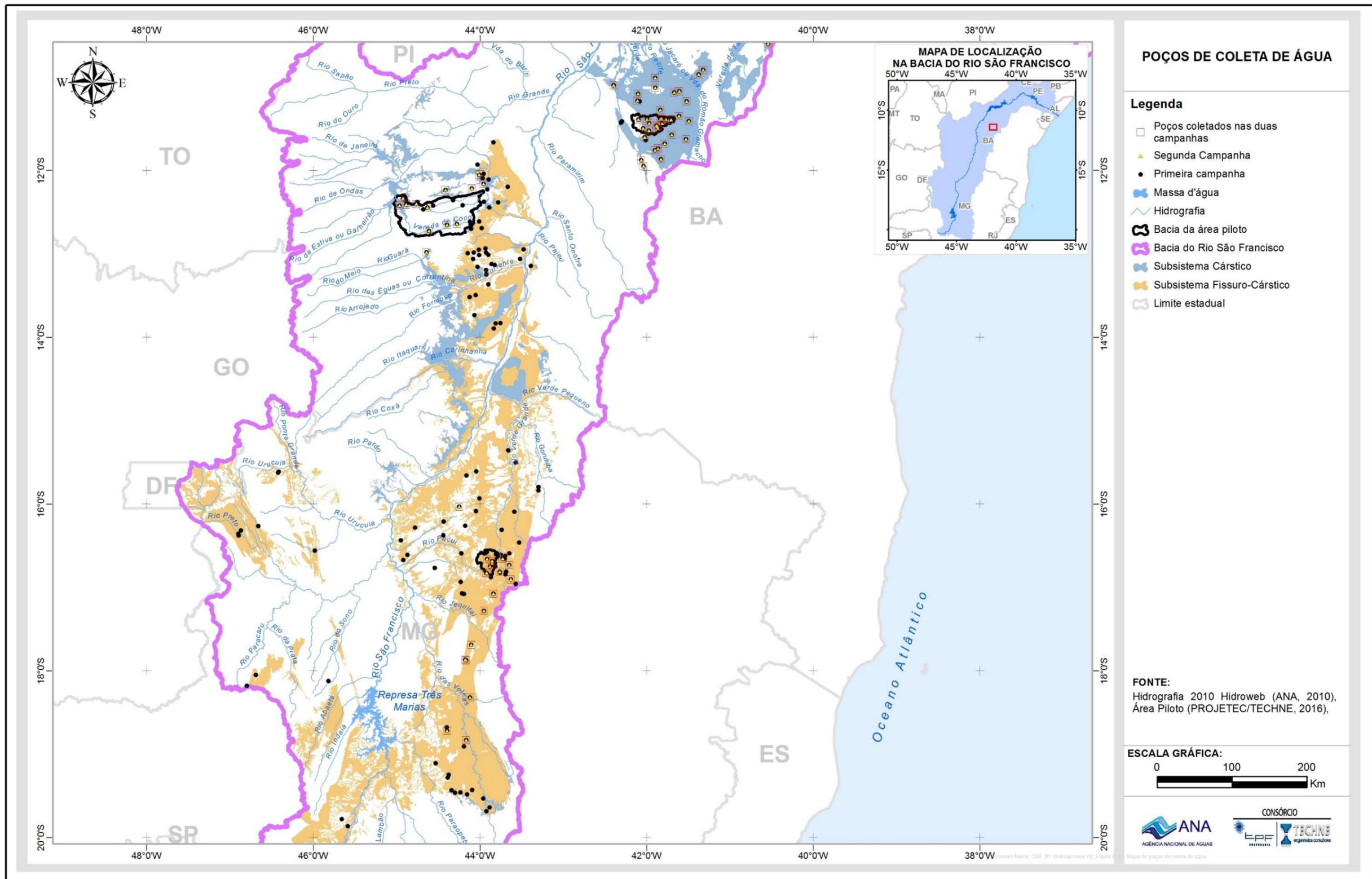


Figura 2.1 – Mapa de poços de coleta de água

3. Amostragem e Análises - Primeira Campanha

3.1 Rede de amostragem, procedimentos de coleta e métodos de análise

A primeira campanha de coleta foi realizada entre os dias 19/08/2014 e 30/09/2014, caracterizando o período seco da região (estiagem). Foram coletadas amostras em 203 poços distribuídos nas três áreas de estudo, amostrados. A Tabela 3.1 contempla um sumário numérico das amostras coletadas. A localização dos poços amostrados nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério podem ser visualizadas nas Figuras 3.1 a Figura 3.3, respectivamente. A identificação das amostras coletadas, conforme a denominação dos poços utilizada no cadastro, consta no ANEXO 1.

Tabela 3.1 - Sumário quantitativo de amostras coletadas.

| Área | Número de amostras | | | Período de coleta |
|----------------------|--------------------|----------|-------|---------------------|
| | Piloto | Regional | Total | |
| Irecê | 13 | 29 | 42 | 19/08/14 a 09/09/14 |
| Montes Claros | 14 | 83 | 97 | 19/08/14 a 30/09/14 |
| São Desidério | 14 | 50 | 64 | 19/08/14 a 30/09/14 |
| Total Projeto | | | 203 | |

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. Em campo, com auxílio de sondas multiparamétricas, foram medidos pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e potencial de oxirredução. Os laudos de análise química estão apresentados no ANEXO 2. A Tabela 3.2 faz uma associação entre a nomenclatura adotada na primeira campanha, na qual os nomes constavam com os códigos de origem, e o código de cadastro do Consórcio, bem como os referidos dados tabelados encontram-se no ANEXO 3.

Tabela 3.2 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água.

| Correlação dos pontos de coleta de água do consórcio com a nomenclatura da 1ª campanha de coleta | |
|---|--|
| ID Consórcio | ID 1ª Campanha |
| C-001 | IR-129P |
| C-002 | IR-109 |
| C-003 | IR-108P |
| C-004 | IR-013P |
| C-005 | IR-162P |
| C-006 | 2900013530 (SIAGAS) |
| C-007 | 2900013904 (SIAGAS) |
| C-008 | IR-149P |
| C-009 | IR-106P |
| C-010 | IR-506P |
| C-011 | IR-124P |
| C-012 | IR-151P |
| C-013 | IR-086P |
| C-014 | 2900013609 (SIAGAS) |
| C-015 | IR-134R |
| C-016 | 2900014133 (SIAGAS) |
| C-017 | ING IR3128 |
| C-018 | CERB (SÃO GABRIEL) POVOADO DE EUREKA |
| C-019 | CERB (SÃO GABRIEL) POVOADO DE NOVOS BANDEIRANTES |
| C-020 | CERB (JUSSARA) POVOADO DE MARINGA2 |
| C-021 | CERB (JUSSARA) POVOADO DE RECIFE |
| C-022 | CERB (MUNICÍPIO DE BARRO ALTO) POVOADO DE FORMOSA |
| C-023 | IR-199R |
| C-024 | SIAGAS 2900013001 MUNICÍPIO DE BARRO ALTO (POVOADO DE COVÃO) |
| C-025 | CERB (BARRO ALTO) POVOADO DE SANTANA DO MEIO |
| C-026 | INGA IR 4015 |
| C-027 | CERB (MUNICÍPIO DE CAFARNAUM) |
| C-028 | CERB (MUNICÍPIO DE ITAGUAÇU DA BAHIA) |
| C-029 | CERB (MUNICÍPIO DE CENTRAL) POVOADO DE SÃO JOÃO DE ARSÊNIO |
| C-030 | MUNICÍPIO DE CENTRAL (CERB) POVOADO DE QUEIMADA |
| C-031 | SIAGAS 2900008273 |
| C-032 | CERB (MUNICÍPIO DE OUROLÂNDIA) POVOADO DE LAGOA |
| C-033 | G16-MUNICÍPIO DE IPERABA CODEVAST DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DE MORORÓS |
| C-034 | CODEVAST DISTRITO DE IRRIGAÇÃO MIRORÓS |
| C-035 | G3-CODEVAST DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DE MIRORÓS |
| C-036 | G7-CODEVAST DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DE MORORÓS |
| C-037 | G4-CODEVAST DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DE MINORÓS |
| C-038 | SIAGAS (2900014221) |
| C-039 | MUNICÍPIO DE BARRA DO MANDES POVOADO DE LAGOA DO PEIXE 2 |
| C-040 | SIAGAS 2900012975 |
| C-041 | SIAGAS 2900009553 |
| C-042 | CERB (MUNICÍPIO DE IBIRABA) POVOADO DE LAPINHA |
| C-043 | MC034P |
| C-044 | MO2 |
| C-045 | 3100013865 |
| C-046 | me033P |

Tabela 3.3 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação.

| Correlação dos pontos de coleta de água do consórcio com a nomenclatura da 1ª campanha de coleta | |
|---|------------|
| C-047 | 3100012703 |
| C-048 | 3100012514 |
| C-049 | 3100012513 |
| C-050 | MC-045P |
| C-051 | 3100020692 |
| C-052 | MC-211 |
| C-053 | MC-213 |
| C-054 | MC075P |
| C-055 | MC 074P |
| C-056 | MC226 |
| C-057 | 3100013300 |
| C-058 | MC227 |
| C-059 | 3100011101 |
| C-060 | 3100011179 |
| C-061 | 3100012767 |
| C-062 | 3100005923 |
| C-063 | MC 228 |
| C-064 | 3100005922 |
| C-065 | 3100000604 |
| C-066 | MC083 |
| C-067 | MC 98 |
| C-068 | 3100001570 |
| C-069 | MC 229 |
| C-070 | MC 230 |
| C-071 | MC - 232 |
| C-072 | 3100010999 |
| C-073 | MC-231 |
| C-074 | 3100011514 |
| C-075 | 3100011560 |
| C-076 | 3100012330 |
| C-077 | MC 236 |
| C-078 | MC 235 |
| C-079 | 3100017334 |
| C-080 | MC 233 |
| C-081 | 3100013326 |
| C-082 | MC 240 |
| C-083 | 3100006321 |
| C-084 | 3100013487 |
| C-085 | 3100002193 |
| C-086 | 3100002169 |
| C-087 | 3100003279 |
| C-088 | 3100003291 |
| C-089 | 3100002195 |
| C-090 | MC234 |
| C-091 | 3100002173 |
| C-092 | MC 241 |
| C-093 | MC 242 |

Tabela 3.4 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação.

| Correlação dos pontos de coleta de água do consórcio com a nomenclatura da 1ª campanha de coleta | |
|---|--|
| C-094 | 3100002552 |
| C-095 | 3100003257 |
| C-096 | 3100003243 |
| C-097 | 3100003199 |
| C-098 | MC 244 |
| C-099 | MC 245 |
| C-100 | 3100019892 |
| C-101 | 3100019815 |
| C-102 | 3100001426 |
| C-103 | MC 243 |
| C-104 | 3100019198 |
| C-105 | MC 247 |
| C-106 | MC 248 |
| C-107 | MC 249 |
| C-108 | 3100017518 |
| C-109 | 3100001175 |
| C-110 | 3100001175 |
| C-111 | 3100020983 |
| C-112 | 3100017195 |
| C-113 | MC /623731/8111255 |
| C-114 | CO8 COPASA MUNICIPIO DE JZPORVAR |
| C-115 | SIAGAS 3100014009 |
| C-116 | CO2 - COPASA MUNICIPIO DE MIRABELA |
| C-117 | CO8 - COPASA MUNICIPIO DE MIRABELA |
| C-118 | SIAGAS 3100010786 |
| C-119 | SIAGAS 3100000596 |
| C-120 | SIAGAS 3100014570 |
| C-121 | 523750 - 8199671 |
| C-122 | SIAGAS 3100014619 |
| C-123 | CO4 - COPASA MUNICIPIO DE SÃO JOÃO DA PONTE |
| C-124 | SIAGAS 3100014149 |
| C-125 | SIAGAS 3100014114 |
| C-126 | MUNICÍPIO DE JANAÚBA POSTO DE GASOLINA IPIRANGA |
| C-127 | Município de Janaúba |
| C-128 | MUNICIPIO DE JAÍDA |
| C-129 | MUNICIPIO DE VERDELANDIA ASSENTAMENTO BOA VISTA |
| C-130 | SIAGAS 3100013314 |
| C-131 | CO2 COPASA DISTRITO DE BONANZA (MUNICIPIO DE IBIRACATU) |
| C-132 | Sigas 3100014890 |
| C-133 | CERAMICA BARRO BRANCO (ANTIGO POÇO DA COPASA) MUNICIPIO DE BURUTIS |
| C-134 | Posto Rabello municipio de buritis |
| C-135 | POSTO BR MUNIPIO DE UNAI |
| C-136 | CHACARA CAPUL MUNICIPIO DE UNAI |
| C-137 | Chácara Capul Munic. de Unai |
| C-138 | SIAGAS 3100015315 |
| C-139 | Hidrofonte municipio de Unai |
| C-140 | 2900005364 |

Tabela 3.5 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação.

| Correlação dos pontos de coleta de água do consórcio com a nomenclatura da 1ª campanha de coleta | |
|---|------------------------------|
| C-141 | 2900013375 |
| C-142 | 2900013368 |
| C-143 | 2900013376 |
| C-144 | 2900001911 |
| C-145 | 2900013344 |
| C-146 | 2900013343 |
| C-147 | 2900014231 |
| C-148 | 2900013340 |
| C-149 | 290001749 |
| C-150 | 2900014232 |
| C-151 | 2900013374 |
| C-152 | 2900005440 |
| C-153 | 2900005448 |
| C-154 | 2900024651 |
| C-155 | 2900014146 |
| C-156 | 2900013378 |
| C-157 | 2900013028 |
| C-158 | 2900013051 |
| C-159 | 2900013048 |
| C-160 | 2900013061 |
| C-161 | 2900013066 |
| C-162 | 2900013027 |
| C-163 | 2900013417 |
| C-164 | 0615183-8541793 |
| C-165 | 2900013427 |
| C-166 | 2900013430 |
| C-167 | 2900013420 |
| C-168 | 2900013421 |
| C-169 | 2900013412 |
| C-170 | Cerb: 620934-8570827 |
| C-171 | Cerb: 619333-8560861 |
| C-172 | 2900000298 |
| C-173 | 2900013493 |
| C-174 | 2900000251 |
| C-175 | 2900013452 |
| C-176 | 610885-8596460 |
| C-177 | 2900013436 |
| C-178 | 2900013336 |
| C-179 | 2900013336: 609843-8606946 |
| C-180 | 2900013321/632657-8630535 |
| C-181 | 2900013323: 624010 - 8623263 |
| C-182 | 2900013418/627328-8547633 |
| C-183 | 2900013425/623599-8548788 |
| C-184 | 2900013332/625495-8621961 |
| C-185 | 2900000075 |
| C-186 | 618595-8647948 |
| C-187 | 607731 - 8667040 |

Tabela 3.6 - Correlação dos pontos de coleta de água com a nomenclatura da primeira campanha de coleta de água – Continuação.

| | |
|--------------|----------------------------|
| C-188 | 605676-8671093 |
| C-189 | 613565-8654848 |
| C-190 | 2900023248/602852-8505214 |
| C-191 | 610311 - 8509882 |
| C-192 | 2900013440: 619234-8521891 |
| C-193 | 594654-8505249 |
| C-194 | 606908 - 8584643 |
| C-195 | 2900006806/665307-8568073 |
| C-196 | 2900013485/660739-8555201 |
| C-197 | 2900013658/683379-8545782 |
| C-198 | 678225-8538855 |
| C-199 | 651271-8522684 |
| C-200 | 2900000136/636945-8484008 |
| C-201 | 2900024796/625843-8463328 |
| C-202 | 628360-8469885 |
| C-203 | 2900000292/632900-8473414 |

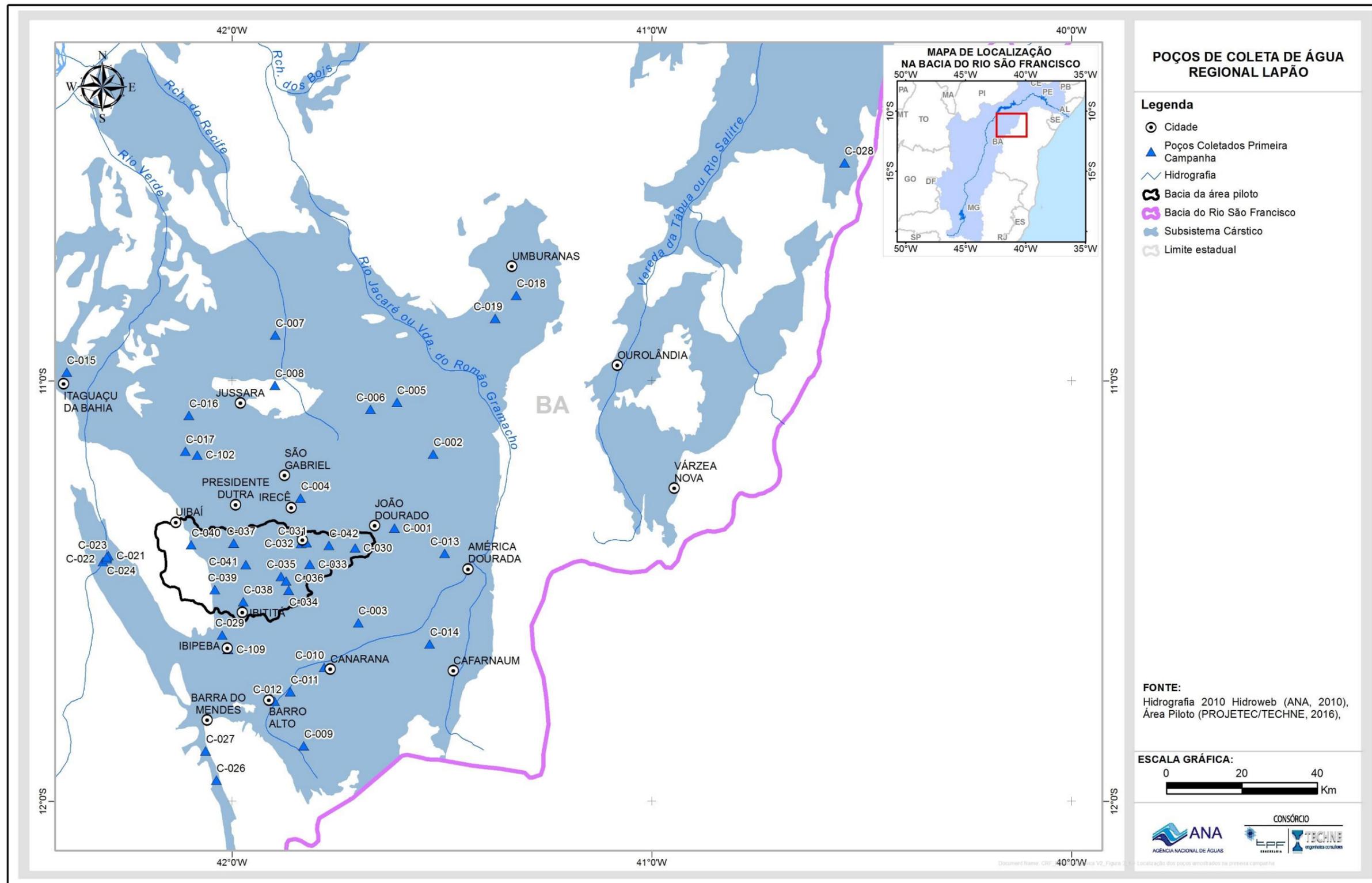


Figura 3.1 – Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de Irecê – BA, piloto e regional.

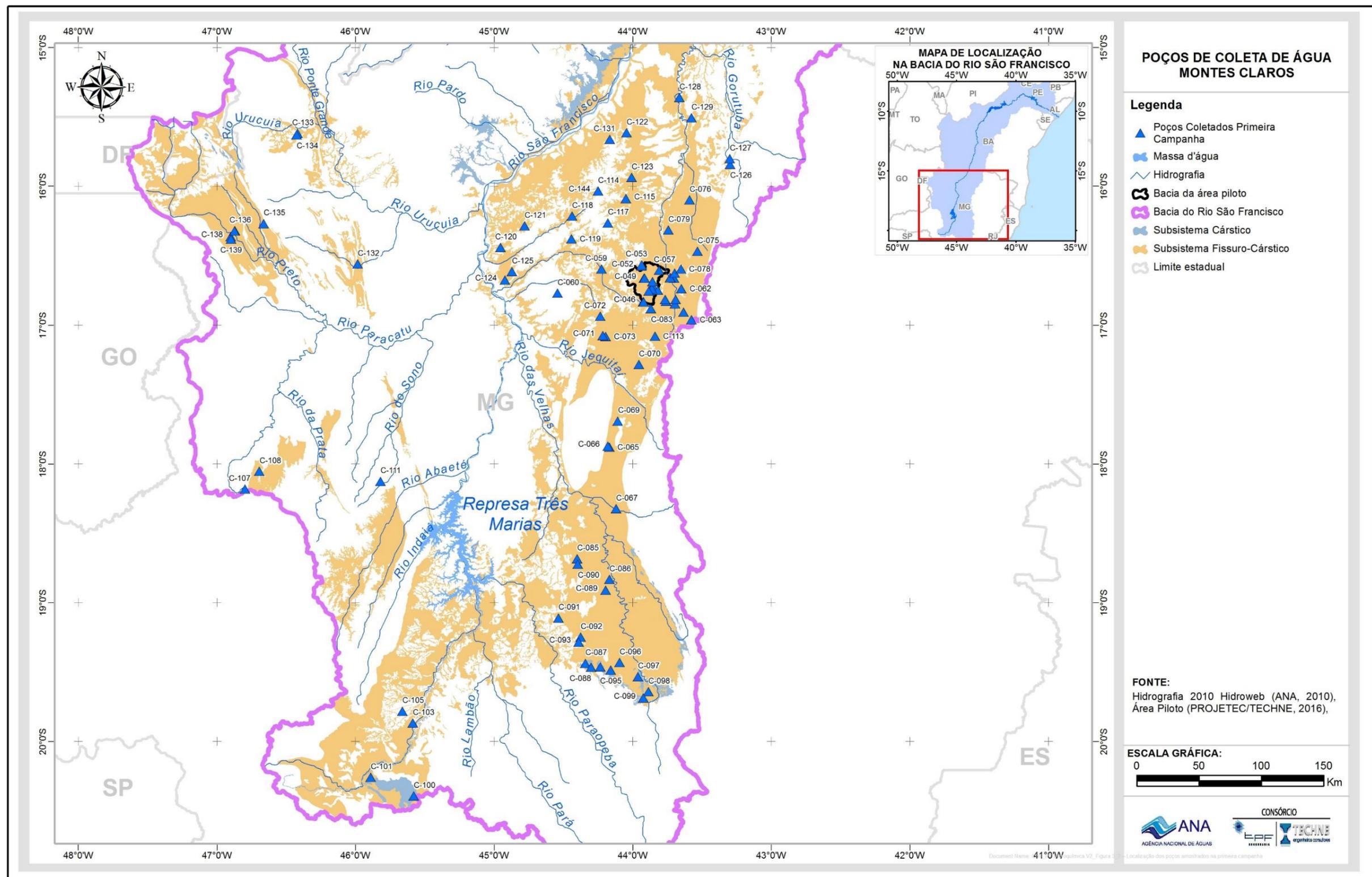


Figura 3.2– Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de Montes Claros – MG, piloto e regional.

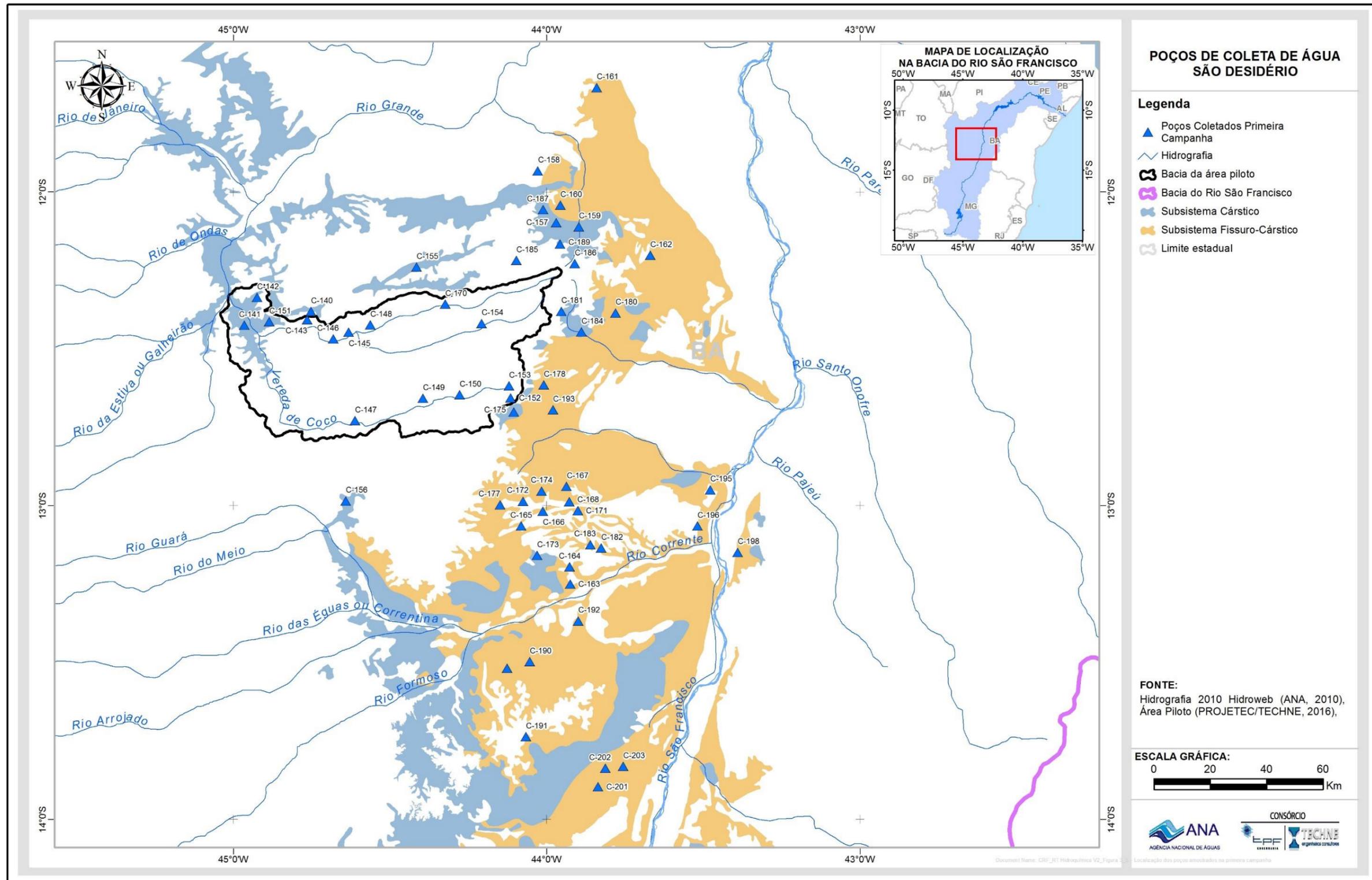


Figura 3.3 – Localização dos poços amostrados na primeira campanha (período seco) na área de São Desidério – BA, piloto e regional.

Nos casos em que as bombas dos poços se encontravam desligadas no momento da coleta, elas foram acionadas por aproximadamente 30 minutos antes de se fazer a coleta. Dessa forma, a água no interior do poço foi renovada, evitando-se a coleta de porções estagnadas não representativas da formação geológica. As coletas sempre foram realizadas o mais próximo possível do poço, e nunca a partir de águas armazenadas em caixas d'água e/ou tendo sofrido adição de cloro.

Antecedendo a coleta de amostras foram medidos parâmetros *in situ* mediante sondas específicas, conforme (Tabela 3.7) e Figura 3.4 a Figura 3.7.

Tabela 3.7 - Parâmetros obtidos in situ equipamento utilizado.

| Parâmetro | Marca e Modelo da Sonda |
|---|----------------------------------|
| pH | HANNA - HI 8424; HI98129 |
| Temperatura, °C | HANNA - HI 8424; HI98129; HI8731 |
| Condutividade elétrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$ | HANNA - HI8731; HI98129 |
| Sólidos dissolvidos totais, mg/L | HANNA - HI98129; HI8731 |
| Potencial de oxirredução, mV | HANNA - HI3230B |



Figura 3.4 – Logística de campo envolvendo a medição e anotação dos parâmetros obtidos in situ.



Figura 3.5 – Utilização de sonda para medição do pH da água.



Figura 3.6 – Utilização de sonda para medição do ORP da água.



Figura 3.7 – Utilização de sonda para medição do ORP da água.

Para cada poço foram preenchidos quatro frascos (Figura 3.8), conforme detalhamento na (Tabela 3.8), os quais foram acondicionados em caixas térmicas com gelo e conservados refrigerados até a análise pelo laboratório.



Figura 3.8 – Kit de coleta contendo os 4 frascos utilizados na amostragem.

Tabela 3.1 - Parâmetros, frascaria utilizada e tempo máximo de análise (APHA, 2005).

| Frasco | Tipo de frasco, volume e preservante | Parâmetros | Tempo para Análise |
|--------|---|---------------------------------------|--------------------|
| #1 | Frasco plástico de 1L, refrigerado | Alcalinidade Total | 14 dias |
| | | Bicarbonato (como CaCO ₃) | |
| | | Carbonato (como CaCO ₃) | |
| | | Condutividade Elétrica | 28 dias |
| | | Cor Aparente | 48 horas |
| | | pH (a 25°C) | Imediato |
| | | Potencial Redox | Imediato |
| | | Sólidos Dissolvidos Totais | 7 dias |
| | | Turbidez | 48 horas |
| #2 | Frasco plástico de 1L, refrigerado | Nitrato (como N) | 48 horas |
| | | Nitrito (como N) | |
| | | Cloreto | 28 dias |
| | | Fluoreto | |
| | | Sulfato | |
| #3 | Frasco plástico de 500mL com adição de H ₂ SO ₄ até pH < 2, refrigerado | Dureza Total | 6 meses |
| | | Amônia (como NH ₃) | 14 dias |
| #4 | Frasco plástico 500mL com adição de HNO ₃ até pH < 2, refrigerado | Ferro | 6 meses |
| | | Magnésio | |
| | | Manganês | |
| | | Potássio | |
| | | Sódio | |

As amostras de águas foram analisadas na Bioagri Ambiental, parte delas na filial Bahia e outra parte na filial Belo Horizonte. A Tabela 3.9 detalha para cada parâmetro avaliado o método analítico utilizado e respectivos limites de quantificação (LQ).

Tabela 3.9 – 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 condutímetro | 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 |

3.2 Qualidade analítica dos dados

3.2.1. Avaliação dos parâmetros *in situ*

Foi realizada a avaliação dos parâmetros obtidos *in situ* mediante a comparação com os resultados obtidos em laboratório. Essa ação visa à escolha dos resultados considerados mais confiáveis para cada parâmetro, de modo a se ter, no final, um banco de dados hidroquímico consolidado.

Foram determinados mediante sonda paramétrica *in situ* os seguintes parâmetros: Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Condutividade Elétrica (CE), Potencial Hidrogeniônico (pH), Temperatura (T) e Potencial Redox/ORP.

Os Sólidos Totais Dissolvidos constituem a soma de todos os constituintes dissolvidos na água. As Figuras Figura 3.9 a Figura 3.11 apresentam os resultados do SDT, obtidos em três diferentes situações: mediante sonda de campo, determinado em laboratório e através de cálculo (somatório de íons, conforme APHA, 2005, expresso na Equação 3.1), para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

$$STD = 0.6 * (\text{alcalinidade}) + Na + K + Ca + Mg + Cl + SO4 + SiO3 + NO3 + F$$

(Eq. 3.1)

De maneira geral observa-se um comportamento similar para as três situações. O STD obtido *in situ*, na maioria dos casos, apresenta os menores resultados, enquanto os maiores valores são verificados nas determinações realizadas em laboratório. Os valores obtidos através do cálculo, geralmente, apresentam resultados intermediários, quando comparados aos demais.

No presente projeto optou-se por utilizar resultados correspondentes ao STD determinado em laboratório, levando em consideração que os valores medidos *in situ* e os calculados em laboratório são passíveis de erros:

- O primeiro (medido *in situ*) é estimado através da conversão da medida de condutividade elétrica, em que o valor de CE medido é multiplicado por um fator de conversão que pode variar entre 0,54 e 0,96;
- A segunda maneira é obtida da Equação 3.1, que pode, entretanto, levar a erros se alguns elementos dissolvidos na água não tiverem sido devidamente determinados.

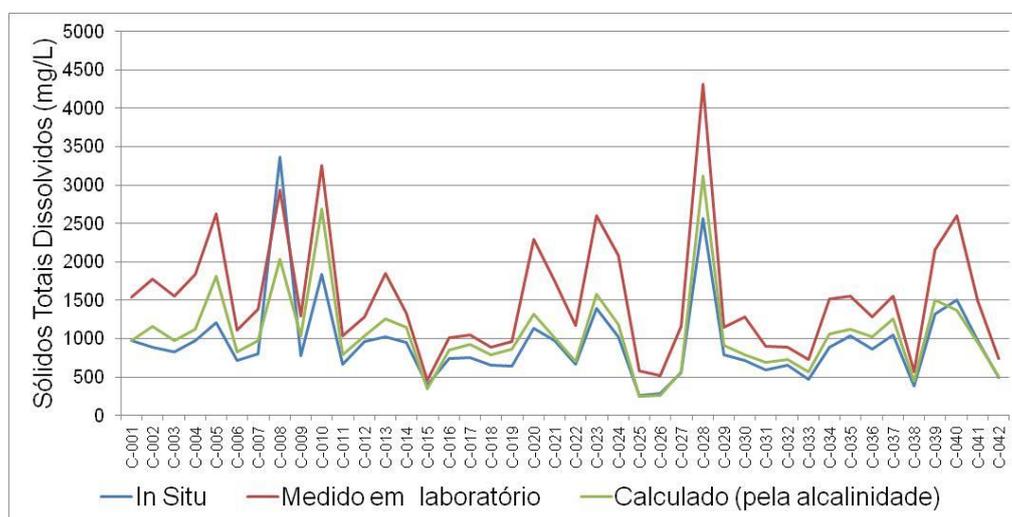


Figura 3.9 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Irecê – BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

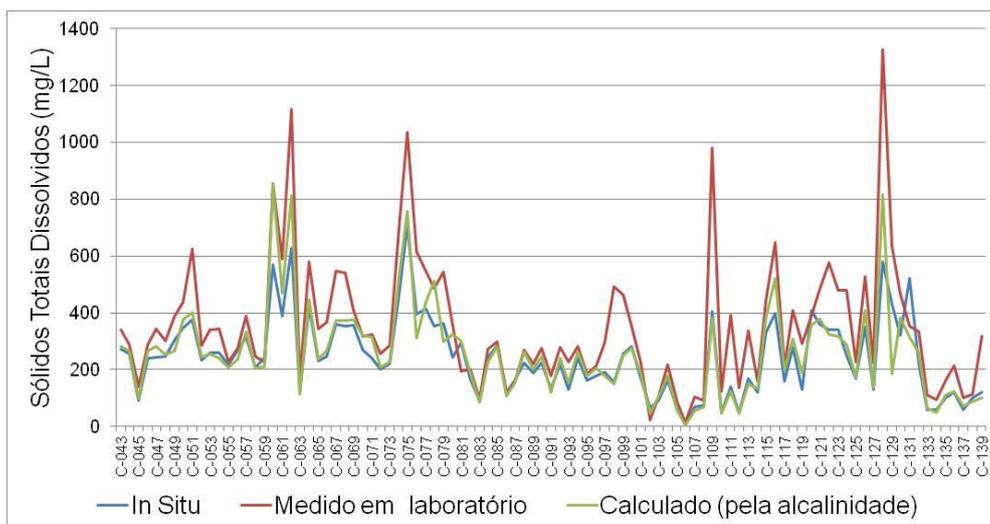


Figura 3.10 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

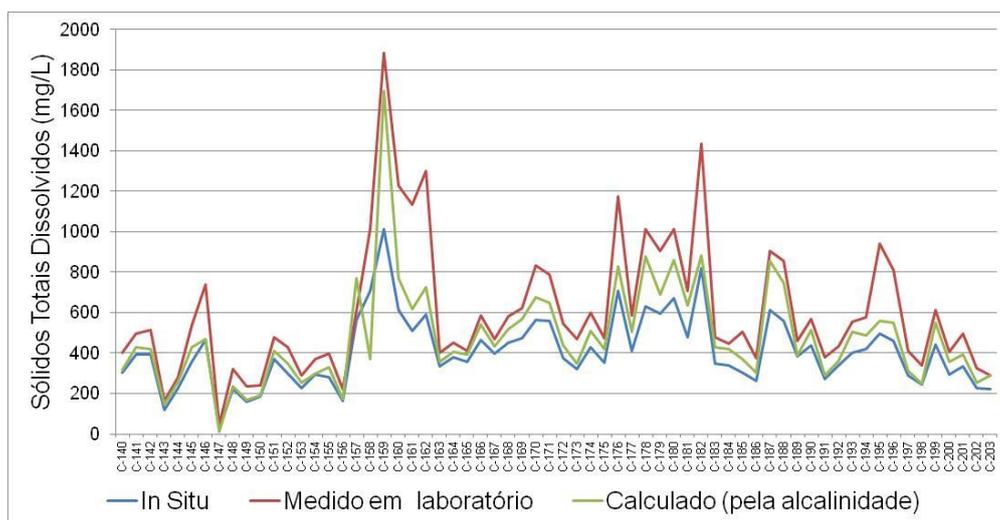


Figura 3.11 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

As Figuras 3.12 a Figura 3.14 apresentam os resultados da CE *in situ* e medida em laboratório para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. A CE corresponde à capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica. Esta capacidade depende basicamente da presença de íons, da concentração total, mobilidade, valência, concentrações relativas e da temperatura (Parron *et al.*, 2011)

Nota-se que os resultados medidos, em ambas as situações, mostram comportamento similares, salvo algumas poucas exceções. As lacunas existentes nos gráficos se devem à ausência de medidas realizadas em laboratório. Essas lacunas, entretanto, não comprometem a consistência do banco de dados, pois o resultado mais confiável de medida de condutividade elétrica é aquele obtido no momento da coleta das amostras de água, já que

medidas posteriores podem fornecer valores diferentes, principalmente se houver mudança de temperatura, escape de gases e/ou formação de precipitados.

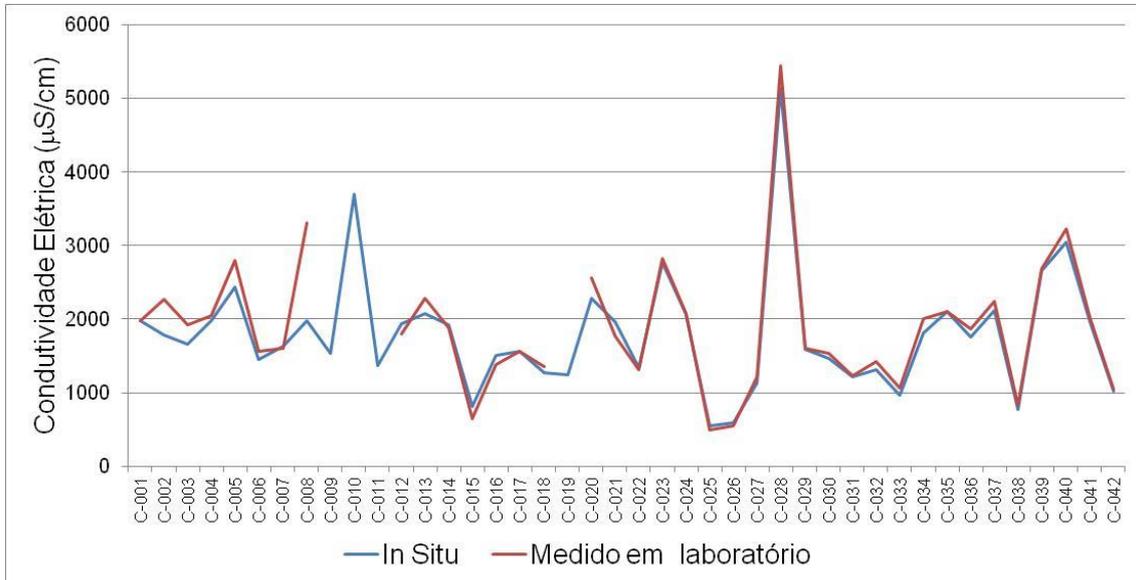


Figura 3.12 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

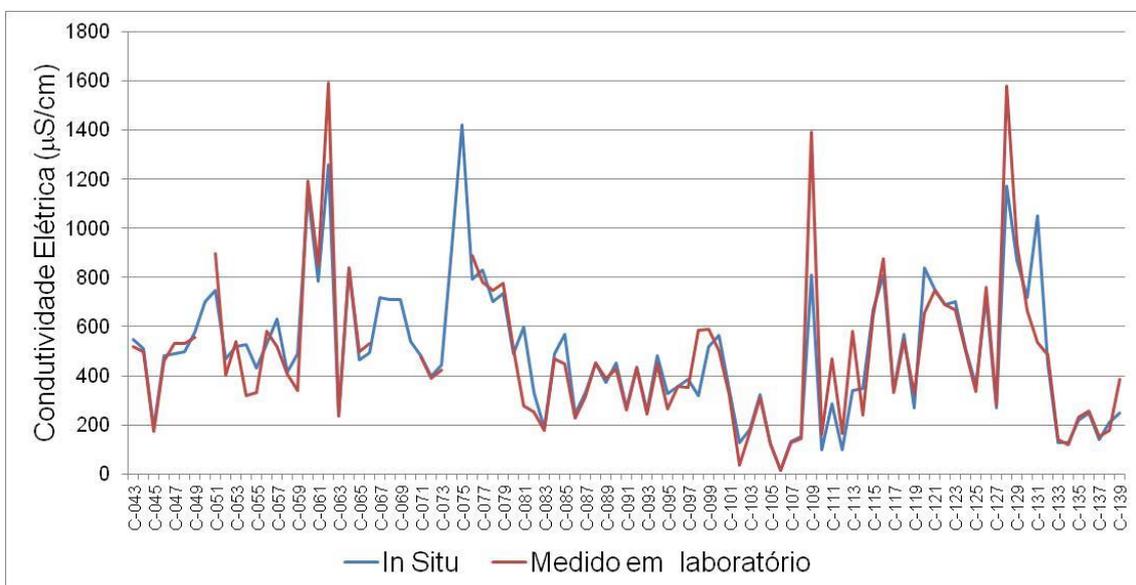


Figura 3.13 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

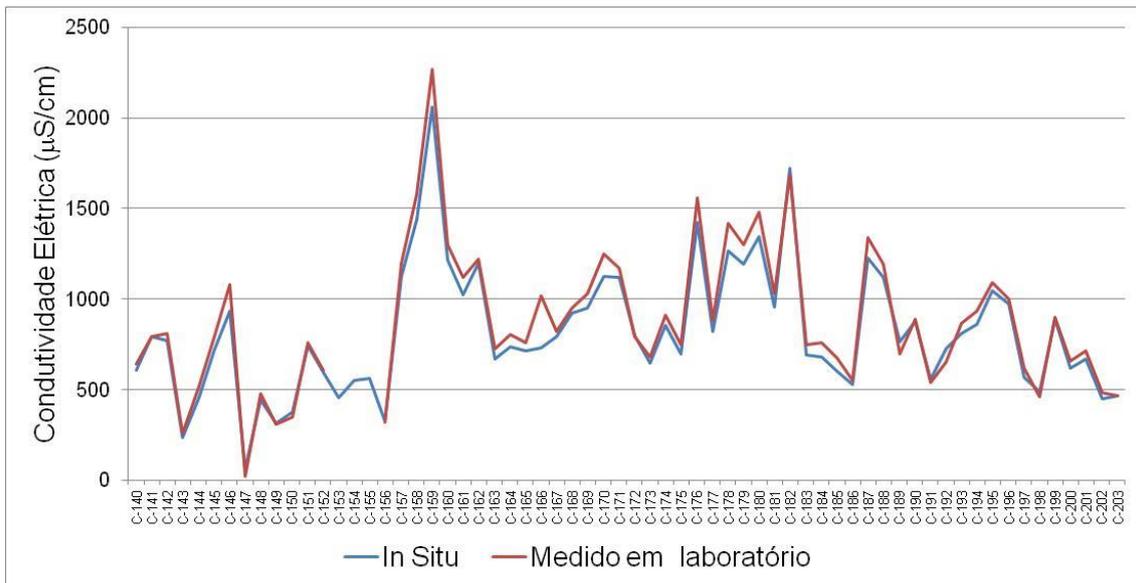


Figura 3.14 – Resultados de Condutividade Elétrica na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

As Figuras 3.15 a Figura 3.17 apresentam os resultados de pH *in situ* e medido em laboratório para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. O pH é a medida da concentração de íons H^+ na água. O balanço dos íons hidrogênio (H^+) e hidróxido (OH^-) determina a intensidade ácida ou básica da água.

Nestes casos, a falta de medidas de laboratório na maioria das amostras prejudica a comparação entre as medidas realizadas *in situ* e no laboratório. Entretanto, enfatiza-se que, para o citado procedimento, o enfoque era comparativo, pois a determinação do pH deve ser preferencialmente realizada no local de coleta. Medidas em laboratório podem fornecer valores bem diferentes dos valores medidos *in situ*, em função de fugas de gases, oxidações e/ou reduções e variações de temperaturas a que estão sujeitas às amostras de água durante a sua coleta, armazenamento e transporte (Feitosa & Filho, 2008).

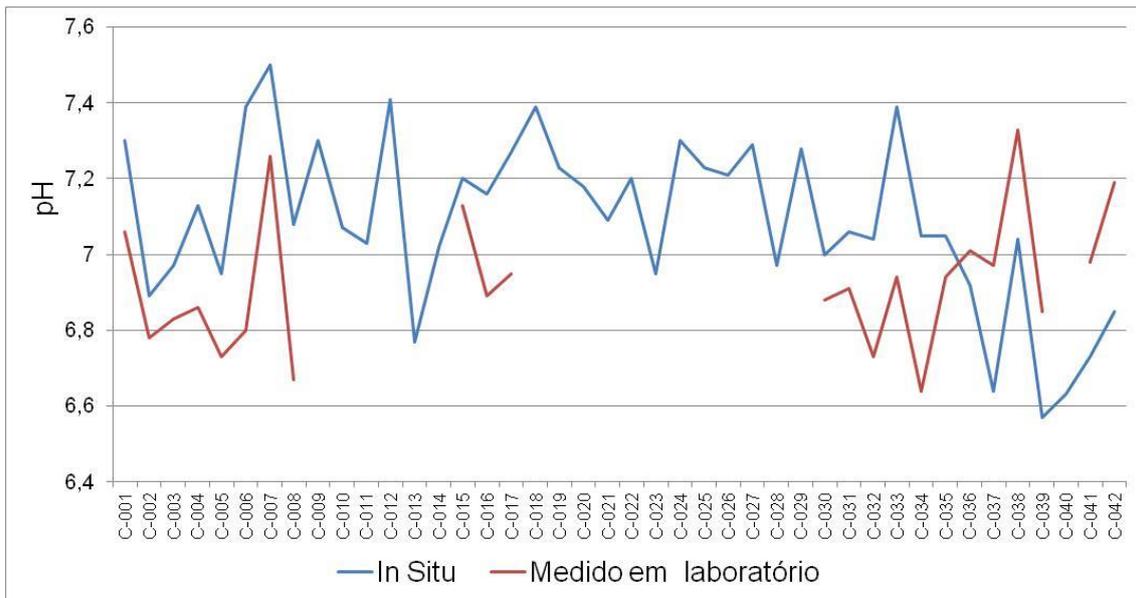


Figura 3.15 – Resultados de pH na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

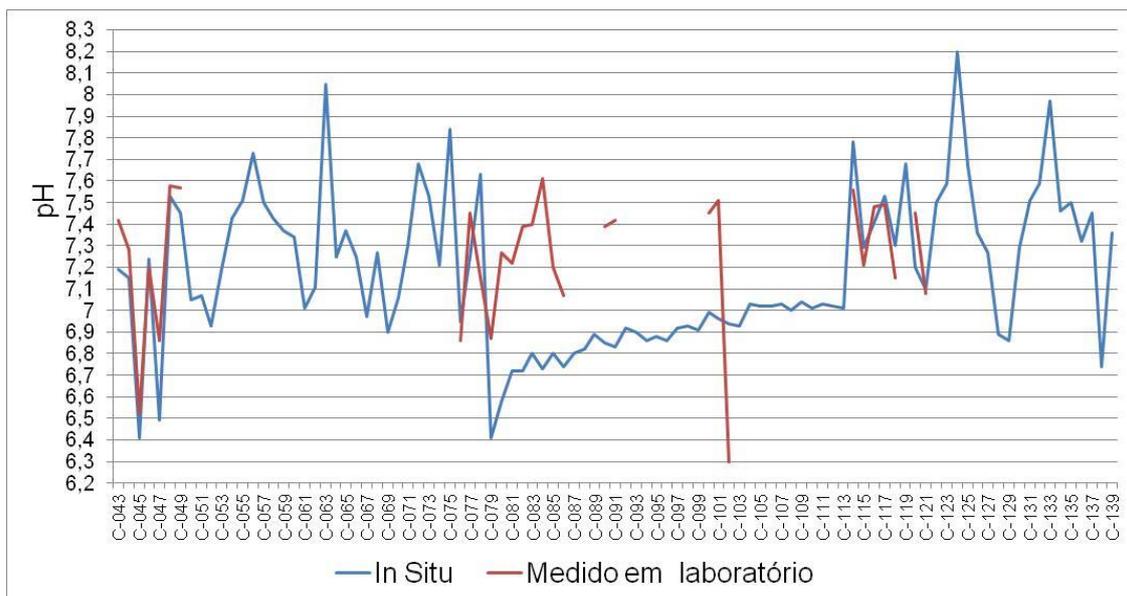


Figura 3.16 – Resultados de pH na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

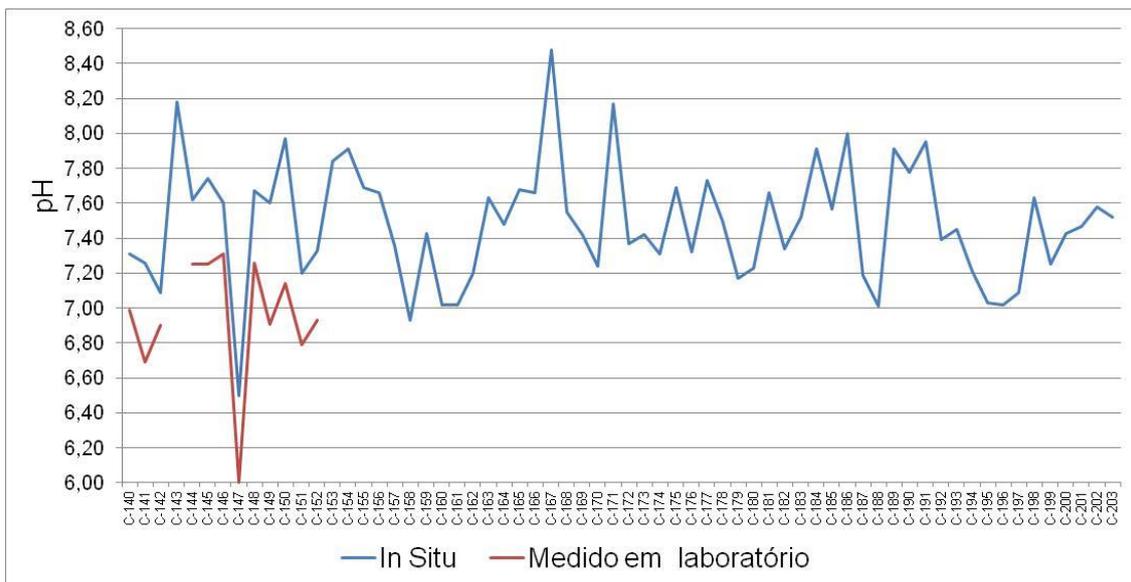


Figura 3.17 – Resultados de pH na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

As Figuras 3.18 a Figura 3.20 apresentam os resultados do potencial redox ou potencial de oxirredução (ORP) *in situ* e medido em laboratório para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. Nos gráficos existem muitas lacunas de medidas de laboratório, que prejudicam a comparação dos dados. Entretanto, assim como já discutido para o parâmetro pH, o sentido das duas medidas é meramente comparativo. As medidas ORP devem ser feitas no local da coleta, para evitar possíveis interferências nos valores medidos, que o armazenamento e transporte das amostras podem ocasionar.

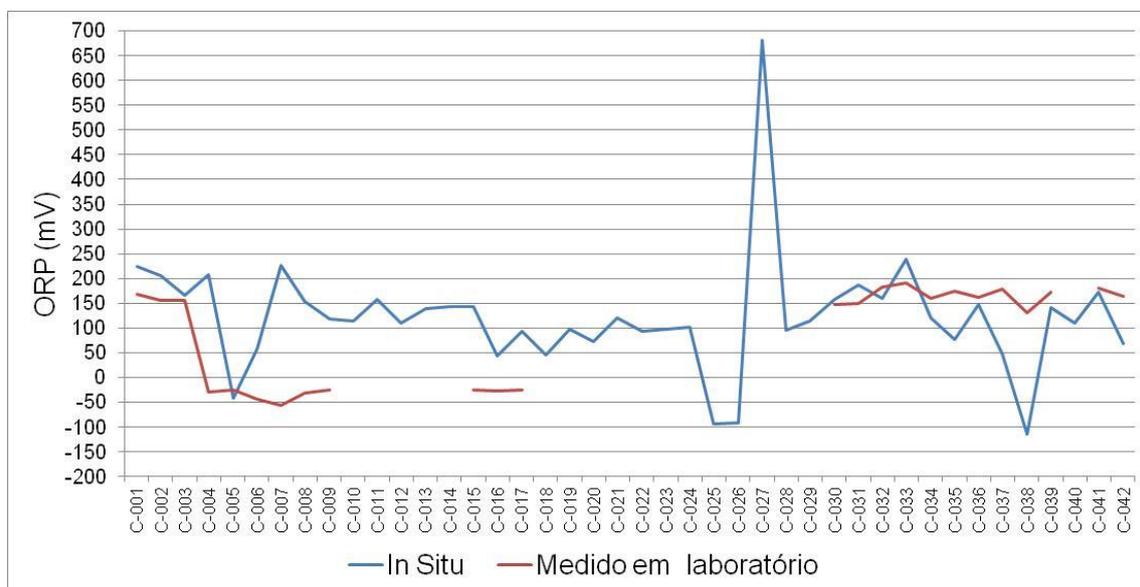


Figura 3.18 – Resultados de ORP na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

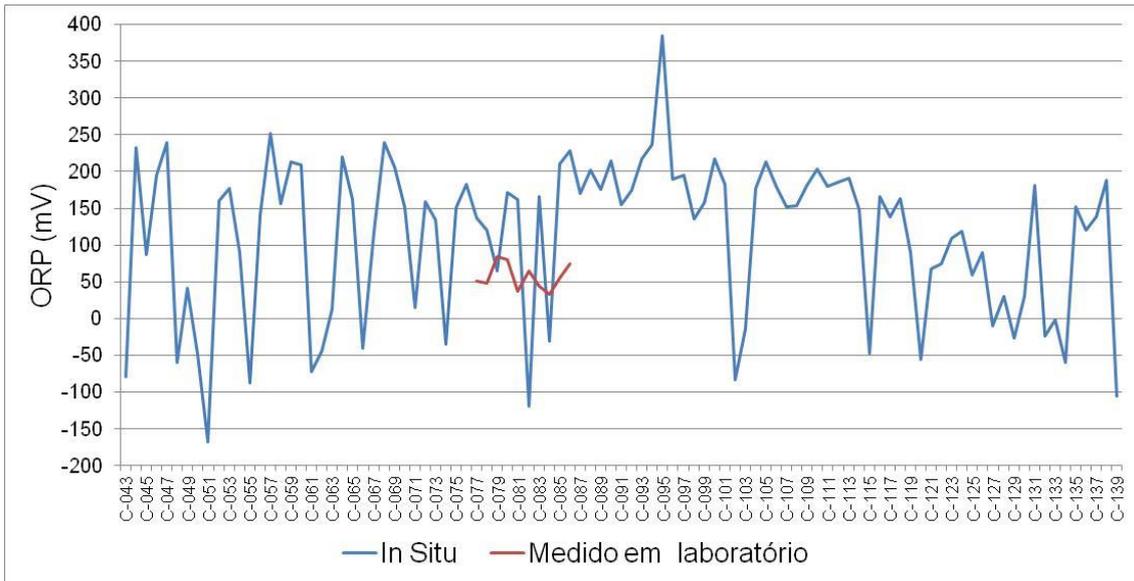


Figura 3.19 – Resultados de ORP na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

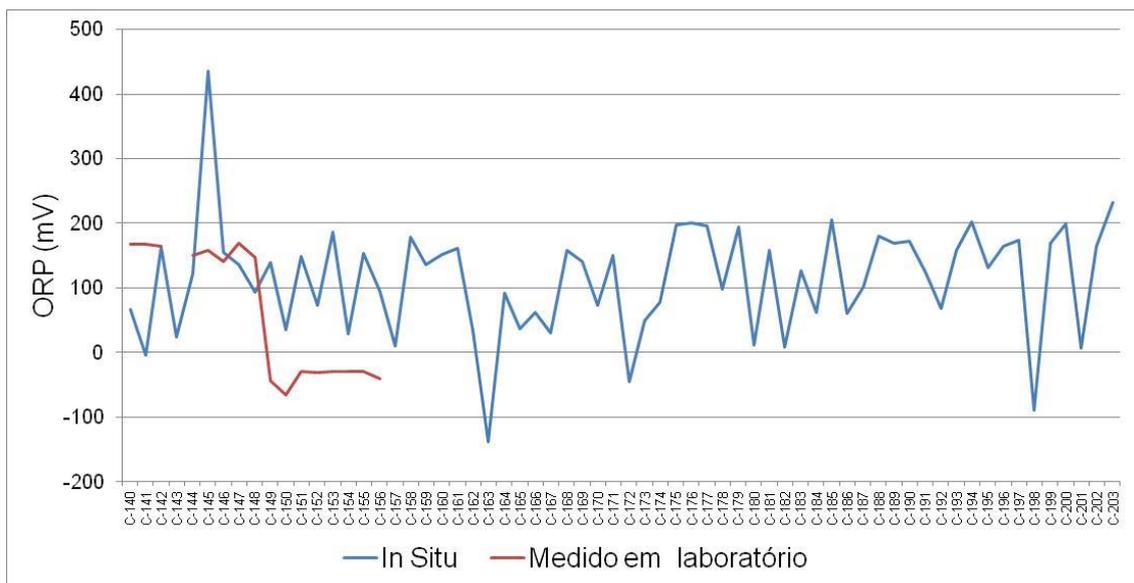


Figura 3.20 – Resultados de ORP na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

As Figuras 3.21 a Figura 3.23 apresentam os resultados de Temperatura *in situ* obtida para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério. A medida de temperatura foi realizada apenas no local da amostragem mediante sonda multiparamétrica. As medidas de temperaturas, assim como as demais medidas *in situ*, foram obtidas após o bombeamento dos poços, para evitar medidas de águas estagnadas não representativas do aquífero.

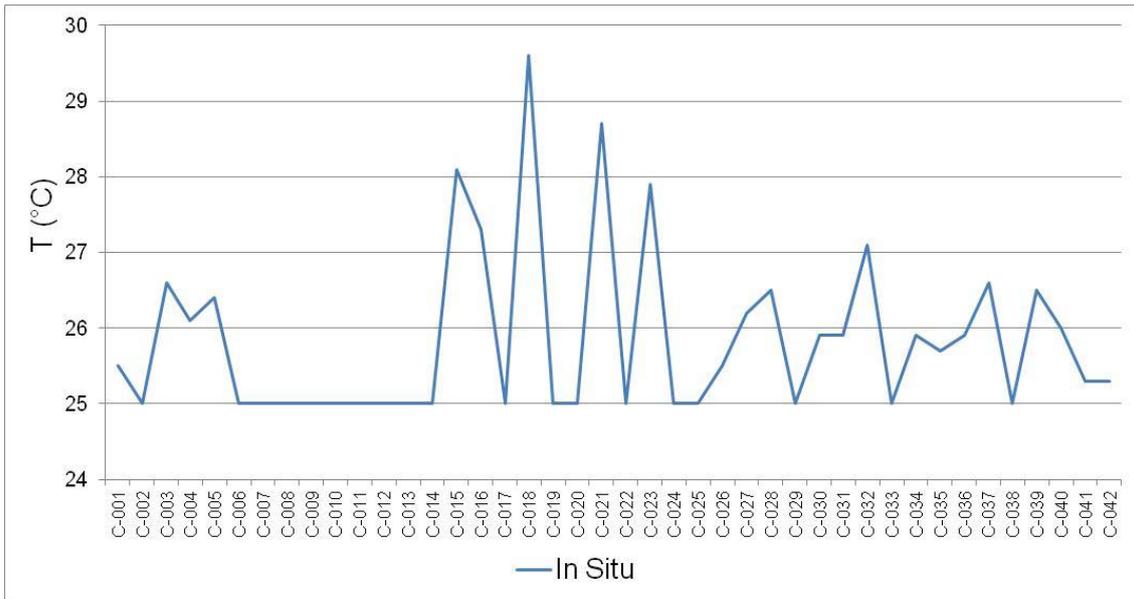


Figura 3.21 – Resultados de Temperatura na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

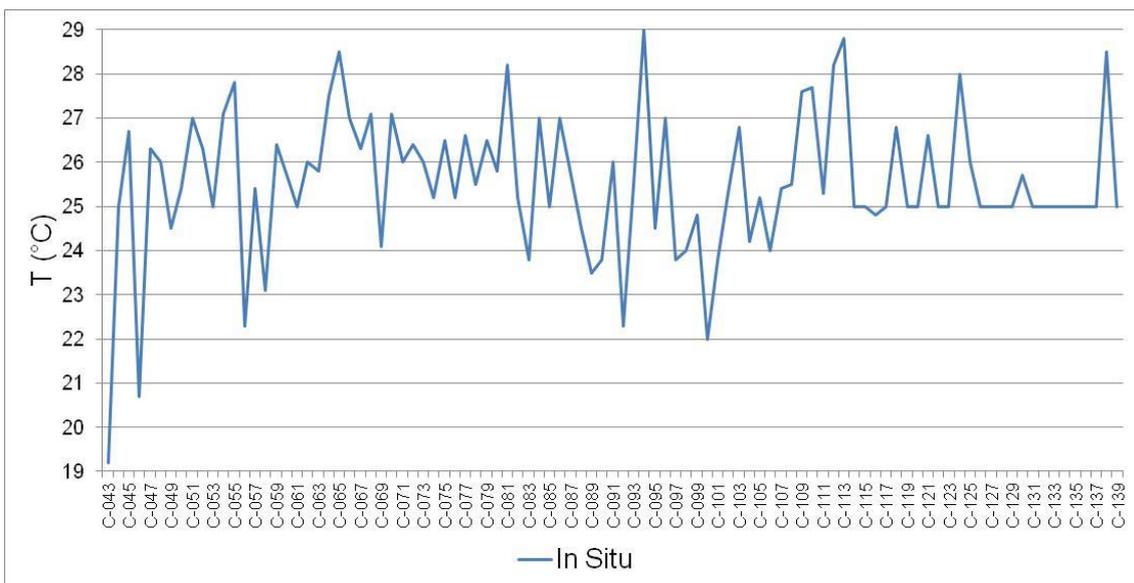


Figura 3.22 – Resultados de Temperatura na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

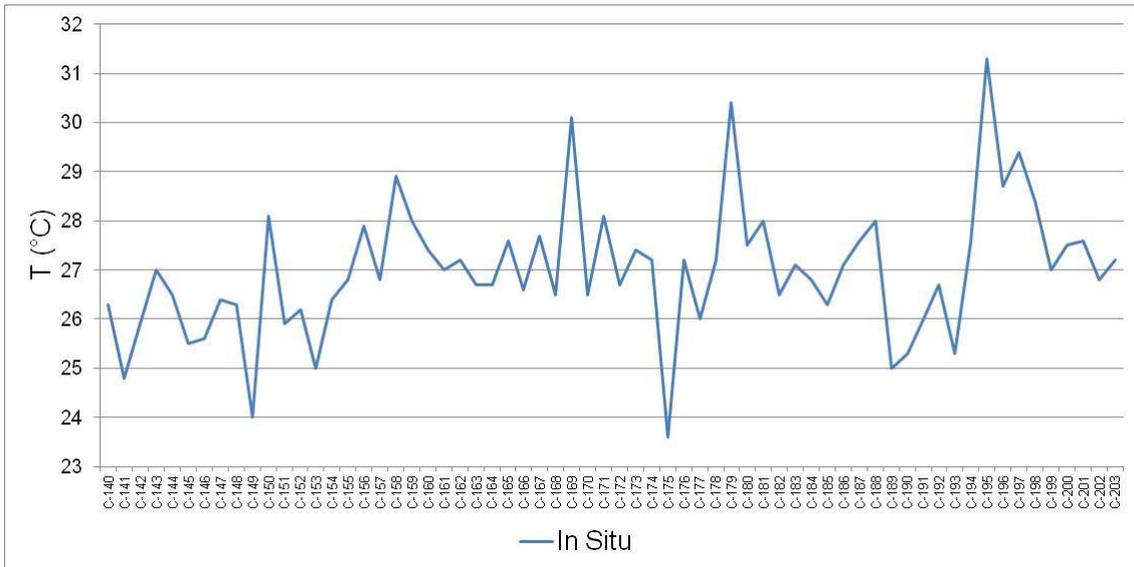


Figura 3.23 – Resultados de Temperatura na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

3.2.2. Cálculo do Balanço iônico

A avaliação do erro numa análise química completa de água pode ser estimada através do balanço de íons, em que a concentração total dos cátions deve ser semelhante à dos ânions, ambos expressos em meq/L. Dessa forma, o valor da desigualdade, expresso em percentagem, é definido como o erro analítico (ou erro da análise).

APHA (2005) aponta que o somatório dos cátions e ânions (em meq/L) deverá equilibrar-se, porque as águas naturais são eletricamente neutras. O teste baseia-se na diferença percentual conforme definido pela Equação 3.2:

$$(\%) \text{ diferença} = 100 * \left[\frac{\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions}}{\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions}} \right] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Onde: $\sum \text{cátions} = \text{Na}^+ + \text{k}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$

$\sum \text{ânions} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{HCO}_3^-$

As principais causas de erros decorrem de uma escolha inadequada da técnica analítica, de falhas no procedimento amostral ou laboratorial, demasiado tempo de armazenamento ou da presença de outros íons não quantificados presentes em quantidades apreciáveis na água. Por outro lado, quando água é pouco mineralizada, pequenas diferenças podem se tornar grandes, quando comparados com concentrações totais dos ânions e dos cátions (Appelo & Postma, 2006).

Feitosa & Filho (2008) consideram que o erro do balanço iônico não deve ser superior a 10% para uma análise ser considerada correta.

As Figuras 3.24 e Figura 3.25 ilustram os resultados obtidos na análise do balanço iônico. No ANEXO 4 constam os resultados de erro no balanço iônico para todas as amostras de águas analisadas.

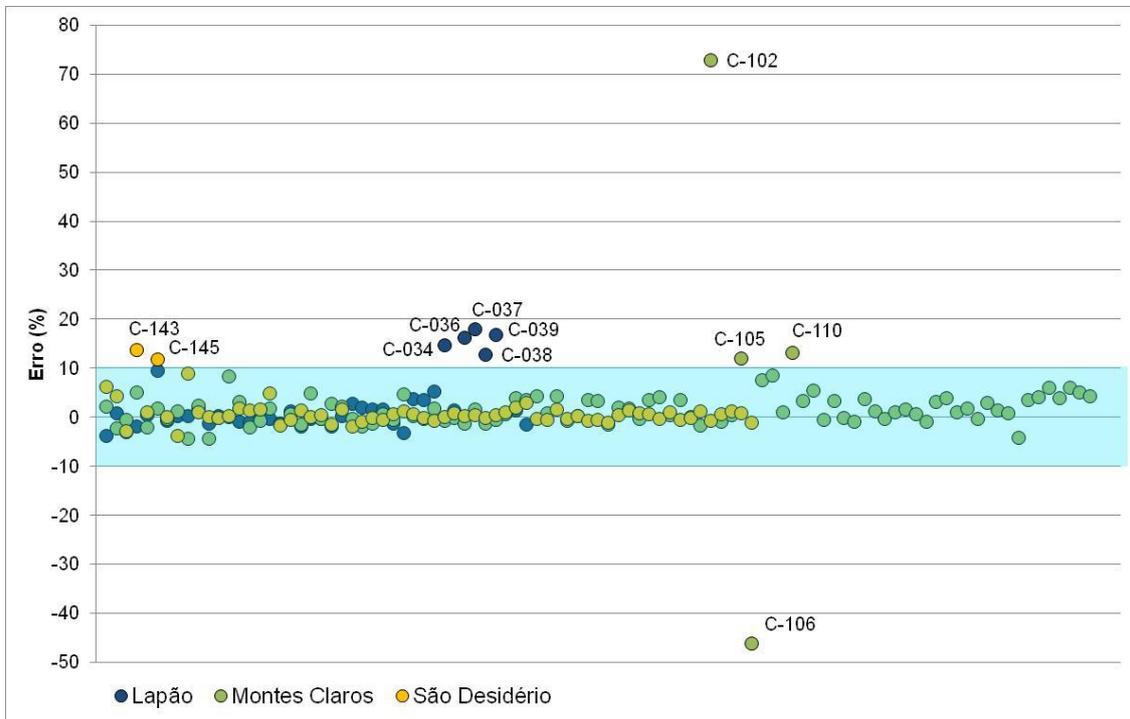


Figura 3.24 – Percentual de erro no cálculo do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

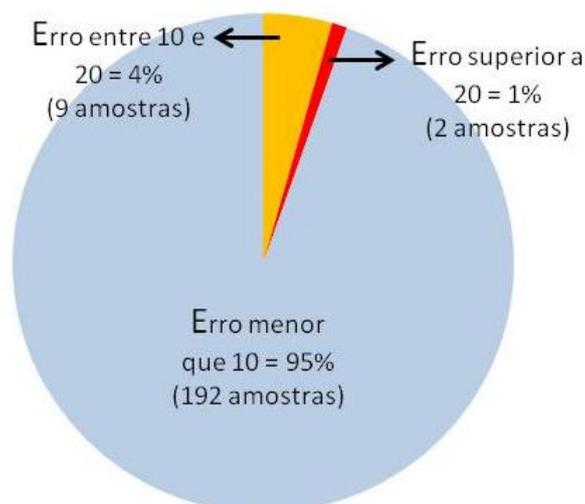


Figura 3.25 – Gráfico de representação percentual do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

Observa-se que no universo de 203 amostras coletadas, distribuídas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério, 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 (C-102 tem 24 mg/L de STD e C-106 tem 13 mg/L de STD). 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 (Feitosa & Filho 2008). Portanto, essas amostras não serão descartadas.

As amostras na faixa de erro entre 10% e 20% serão aceitas nessa etapa de trabalho, porém tratadas com restrições. Para aprofundar essa discussão, esse grupo de amostras foi avaliado no intuito de verificar se o erro de análise está concentrado na determinação dos cátions e/ou dos ânions. APHA (2005) aponta que o somatório dos cátions ou dos ânions dividido pela condutividade elétrica da água, expresso em percentual, conforme detalhado na Equação 3.3, deve estar entre 0,9 e 1,1.

$$100 * \frac{\sum(+)}{CE} \quad e \quad 100 * \frac{\sum(-)}{CE} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde: $\sum (+) = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ (em meq/L)

$\sum (-) = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$, HCO_3^- (em meq/L)

CE= Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Essa análise foi aplicada às nove amostras com erros entre 10 e 20%, e os resultados obtidos podem ser visualizados na (Tabela 3.10). 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 3.10 – 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 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $100 * \frac{\sum(+)}{CE} =$ | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 0,9 | 1,3 | 0,9 |
| $100 * \frac{\sum(-)}{CE} =$ | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,7 | 1,0 | 0,9 |

4. Amostragem e Análises – Segunda campanha

4.1 Rede de amostragem, procedimentos de coleta e métodos de análise

A segunda campanha de amostragem de águas foi realizada no período de 17 de março a 24 de abril de 2015, representando o período úmido (chuvoso) da região.

Os poços da rede foram preferencialmente os mesmos da primeira campanha de amostragem, com algumas modificações, já que algumas substituições foram necessárias, em função de parte dos poços se encontrarem paralisados, ou o proprietário não permitir a coleta de água na data programada, ou devido a problemas de logística. Os poços não coletados e as respectivas justificativas encontram-se na (Tabela 4.1). Para a substituição foram selecionados poços no entorno do original e seguindo os mesmos critérios de seleção da primeira campanha (poços com perfil e preferencialmente de abastecimento). Adicionalmente, pontos não coletados na primeira campanha foram agora coletados, no intuito de acrescentar informações ao trabalho e, ainda, por ocasião da coleta dos parâmetros específicos. Os referidos pontos estão listados na (Tabela 4.2). A identificação das amostras coletadas, conforme a denominação dos poços utilizada no cadastro, consta no ANEXO 1.

Tabela 4.1 - Substituição de poços na segunda campanha de amostragem.

| Área | Poço | Justificativa | Novo poço |
|---------------|-------|---|-----------|
| Irecê | C-005 | Falta de energia | C-005A |
| | C-012 | Bomba queimada | C-012A |
| | C-015 | Motor quebrado | C-015A |
| | C-030 | Poço estava sem bomba | C-030A |
| Montes Claros | C-045 | Proprietário não permitiu coleta | C-045A |
| | C-059 | Más condições das estradas vicinais | C-059A |
| | C-060 | Más condições das estradas vicinais | C-060A |
| | C-122 | Poço secou | C-122A |
| | C-131 | Várias tentativas frustradas de contatar o funcionário responsável. | C-131A |
| São Desidério | C-175 | Bomba quebrada | C-175A |
| | C-182 | Desativado | C-182A |

Tabela 4.2 – Pontos coletados na segunda campanha de amostragem e que não foram coletados na primeira campanha. A identificação CS refere-se a pontos de águas superficiais

| Área | Ponto | Observação | Tipo de coleta |
|---------------|--------|----------------------------------|-------------------------|
| Irecê | C-207 | Poço no quartzito | Físico-químico, isótopo |
| Montes Claros | CS-211 | Gruta do Janelão (Itacarambi) | Agroquímico, isótopo |
| | CS-212 | Lagoa de Pedra (Bambuí) | Agroquímico, isótopo |
| | CS-213 | Rio Verde Grande (Jaíba) | Agroquímico |
| | CS-214 | Surgência do Mocambo (Matozinho) | Isótopo |
| | CS-215 | Surgência da Caucaia (Matozinho) | Isótopo |
| | CS-216 | Surgência da Gordura (Matozinho) | Isótopo |
| São | CS-205 | Nascente do Rio João Rodrigues | Físico-químico, |

| | | | |
|-----------|--------|------------------------------|----------------------|
| Desidério | | | agroquímico, isótopo |
| | CS-206 | Rio Grande | Agroquímico, isótopo |
| | CS-207 | Rio Cabeceira de Pedra | Agroquímico |
| | CS-208 | Rio São Desidério | Agroquímico |
| | CS-209 | Rio Mutamba | Agroquímico |
| | CS-210 | Surgência do Poço do Surubim | Físico-químico |

A segunda campanha contou com a coleta de quatro grupos de parâmetros determinados em laboratório, os quais:

- **Físico-químicos:** sólidos dissolvidos totais, pH, condutividade elétrica, dureza, cor aparente, turbidez, amônia, nitrito, nitrato, ferro, manganês, cálcio, magnésio, potássio, sódio, alcalinidade total, bicarbonato, carbonato, cloreto, fluoreto, sulfato.
- **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, clorantrolilprole, 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)² e Estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$).

Todos os laudos de análises químicas estão apresentados no ANEXO 5, e os referidos dados tabelados no ANEXO 6.

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 de 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. Com base nesses critérios foi elaborado uma Nota Técnica para justificar a seleção dos agroquímicos.

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.

A Tabela 4.3 contempla um sumário numérico das amostras coletadas, perfazendo 216 pontos coletados distribuídos nas três áreas de estudo.

² Os resultados de trítio apresentaram problemas analíticos e, portanto, não foi possível a sua utilização nesse estudo.

Tabela 4.3 - Sumário quantitativo de amostras coletadas.

| Área | | Tipo de amostra | Físico-química | BTEX, Fenóis, metais | Agroquímicos | Isótopos | Período da coleta |
|---------------|--------------|-----------------|----------------|----------------------|--------------|-----------|---------------------------|
| Irecê | Piloto | Subterrânea | 14 | 3 | 13 | 3 | 17/03/15 a 13/04/15 |
| | | Superficial | - | - | - | - | |
| | Regional | Subterrânea | 29 | 4 | 17 | 8 | |
| | | Superficial | - | - | - | - | |
| | Total | | | 43 | 7 | 30 | |
| Montes Claros | Piloto | Subterrânea | 13 | 14 | 2 | - | 19/03/15 a 12/05/15 |
| | | Superficial | 1 | - | - | - | |
| | Regional | Subterrânea | 82 | 22 | 5 | 13 | |
| | | Superficial | - | - | 3 | 6 | |
| | Total | | | 96 | 36 | 10 | |
| São Desidério | Piloto | Subterrânea | 16 | 3 | 5 | 5 | 23/03/15 a 24/04/15 |
| | | Superficial | 2 | - | 2 | 2 | |
| | Regional | Subterrânea | 49 | 4 | - | 13 | |
| | | Superficial | - | - | 3 | - | |
| | Total | | | 67 | 7 | 10 | |

A localização e distribuição dos poços amostrados nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério podem ser visualizadas nas Figura 4.1 a Figura 4.3, respectivamente.

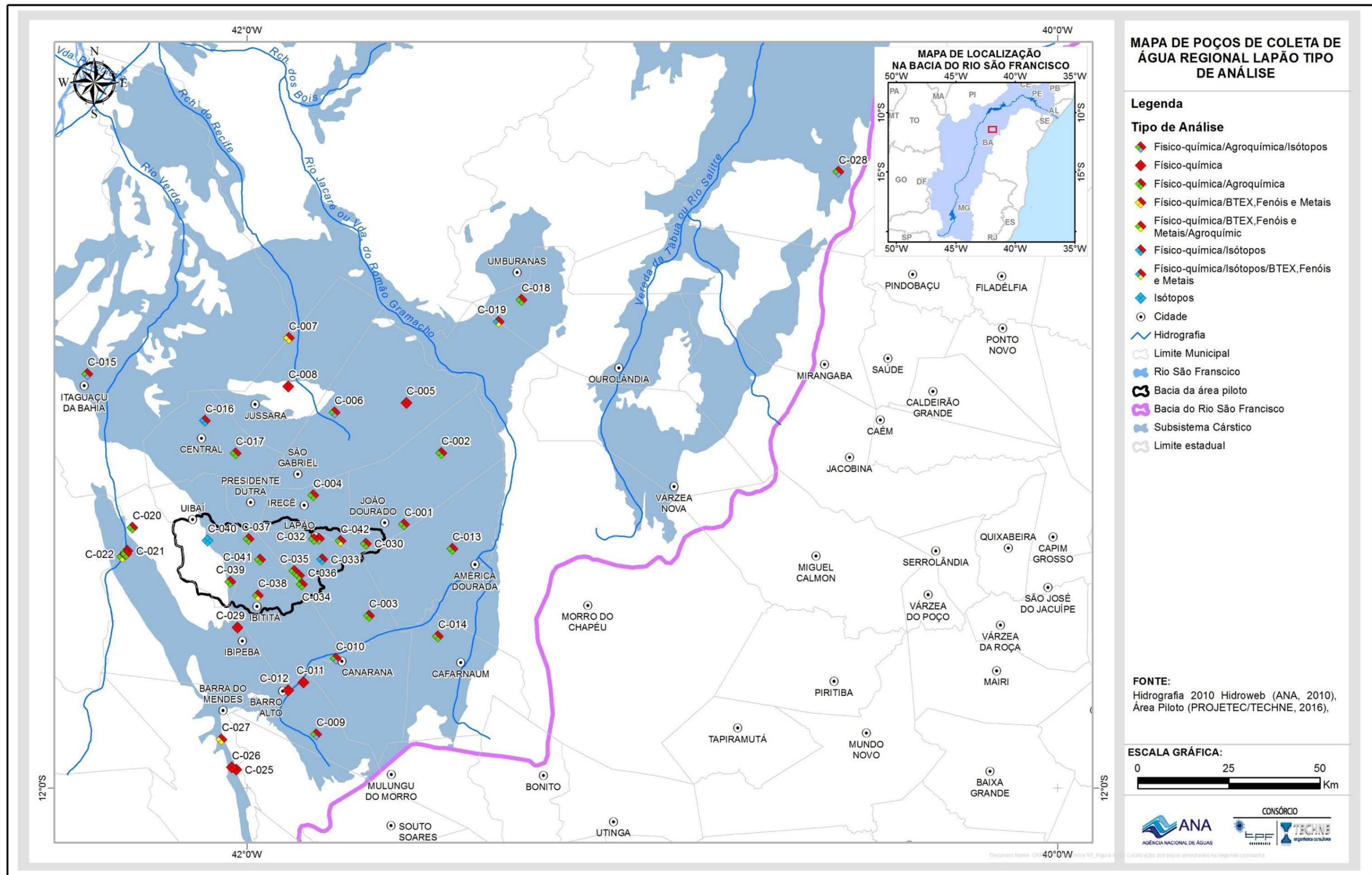


Figura 4.1 – Localização dos poços amostrados na segunda campanha (período úmido) na área de Irecê – BA.

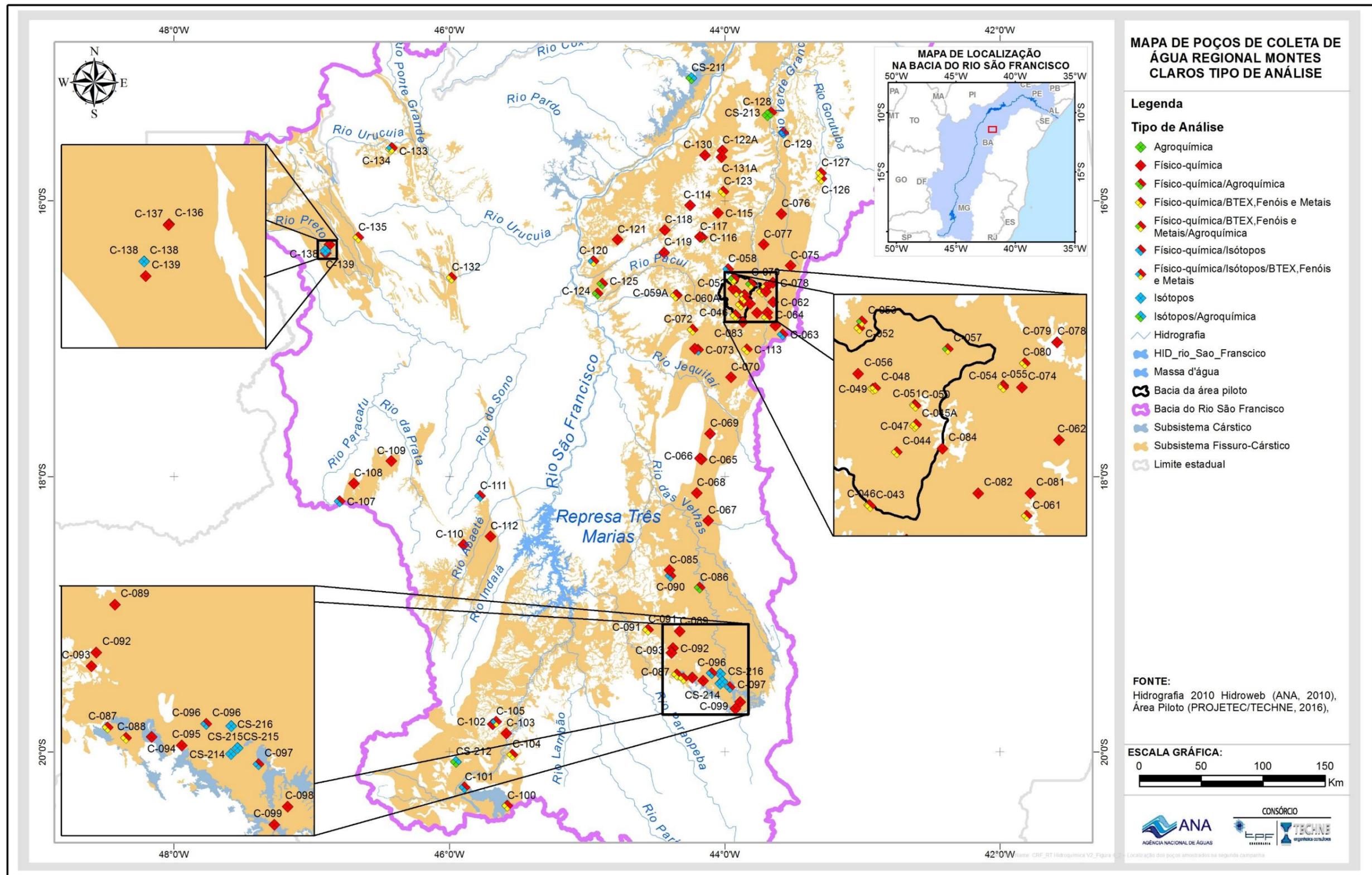


Figura 4.2 – Localização dos poços amostrados na segunda campanha (período úmido) na área de Montes Claros – MG.

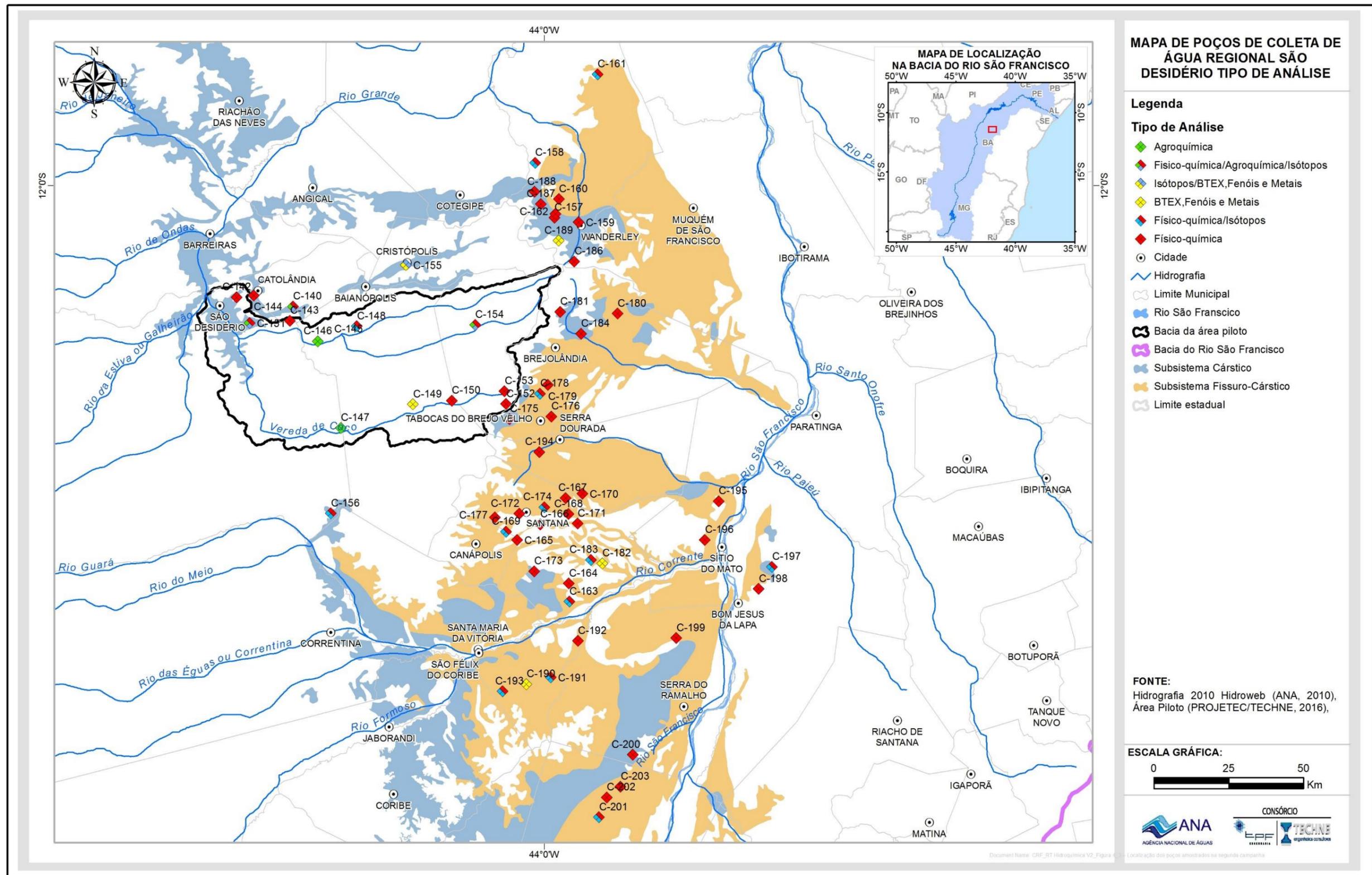


Figura 4.3 – Localização dos poços amostrados na segunda campanha (período úmido) na área de São Desidério – BA.

Nos casos em que as bombas dos poços encontravam-se desligadas no momento da coleta, procedeu-se o acionamento por aproximadamente 30 minutos antes de coletar (Figura 4.4), permitindo a renovação da água e evitando, assim, a coleta de porções estagnadas não representativas da formação geológica. As coletas sempre foram realizadas o mais próximo possível do poço, e nunca coletadas após permanecerem armazenadas em caixas de água, cisternas e/ou adicionadas de cloro.



Figura 4.4 - Bombeamento do poço C-128 (Jaíba/MG) antecedendo a coleta para determinação dos parâmetros físico-químicos, agroquímicos, BTEX, fenóis e metais.

No momento da coleta das amostras foram medidos parâmetros *in situ* mediante o uso de sondas específicas, conforme (Tabela 4.11) e Figura 4.5 a Figura 4.10.

Tabela 4.2 - Parâmetros obtidos *in situ* e equipamento utilizado.

| Parâmetro | Marca e Modelo da Sonda |
|---|----------------------------------|
| pH | HANNA - HI 8424; HI98129 |
| Temperatura, °C | HANNA - HI 8424; HI98129; HI8731 |
| Condutividade elétrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$ | HANNA - HI8731; HI98129 |
| Sólidos Dissolvidos Totais, mg/L | HANNA - HI98129; HI8731 |
| Potencial de oxirredução (ORP), mV | HANNA - HI3230B |



Figura 4.5 – Logística de campo envolvendo a medição dos parâmetros medidos in situ, na surgência do Rebutão dos Ferros (C-056).



Figura 4.6 - Sonda e eletrodos para determinação da temperatura, pH e ORP.



Figura 4.7 - Enchimento do frasco para determinação dos parâmetros in situ.



Figura 4.8 - Inserção do eletrodo para leitura dos parâmetros in situ.



Figura 4.9 - Leitura do parâmetro ORP.



Figura 4.10 - Leitura dos parâmetros condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.

Os frascos utilizados na coleta das águas foram fornecidos pelo laboratório e podem ser visualizados na Figura 4.11. Imediatamente após a coleta eles foram acondicionados em caixas térmicas com gelo (Figura 4.12) e encaminhados por via aerea ou terrestre ao laboratório, de forma que a sua determinação desse início em até 24 horas após a coleta. As Figuras 4.13 e Figura 4.14 ilustram alguns momentos da coleta de águas.



Figura 4.11– Kits de coleta: (a) - frascos para determinação físico-química; (b) frasco para determinação de fenóis; (c) frasco para determinação de metais; (d) frascos para determinação de BTEX; (e) frascos para determinação dos agroquímicos; (f) frascos para determinação dos isótopos.



Figura 4.12 – Caixa térmica com gelo para acondicionamento e envio das amostras para o laboratório.



Figura 4.13 – Coleta das amostras.



Figura 4.14 – Proteção dos frascos para posterior acondicionamento em caixa térmica e envio ao laboratório.

As amostras de águas foram determinadas em laboratórios da Bioagri Ambiental, nas filiais da Bahia e de Belo Horizonte. A (Tabela 4.12) detalha para todos os parâmetros avaliados o método analítico utilizado e respectivos limites de quantificação, bem como o tipo de preservação aplicado na amostra coletada.

Tabela 4.12 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise.

| ID Método | Parâmetros | Limite | Unidade | Preservante + Frasco (todos refrigerados) | Tempo para Análise |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------|---------|---|---|
| Titulação potenciométrica | Alcalinidade Total | 0 | mg/L | Frasco Plástico de 1L refrigerado (1) | 14 dias |
| | Bicarbonato (como CaCO ₃) | 0 | mg/L | | |
| | Carbonato (como CaCO ₃) | 0 | mg/L | | |
| Cromatografia de Ions | Nitrato (como N) | 0,1 | µg/L | Frasco de 100 mL Plástico refrigerado (2) | 48 horas |
| | Nitrito (como N) | 0,02 | µg/L | | 28 dias |
| | Cloreto | 1 | µg/L | | |
| | Fluoreto | 0,1 | µg/L | | |
| | Sulfato | 1 | µg/L | | |
| Leitura em condutivímetro | Condutividade | 0,1 | µS/cm | Mesmo (1) | 28 dias |
| Espectrofotometria | Cor Aparente | 5 | Pt/Co | Mesmo (1) | 48 horas |
| Titulação potenciométrica | Dureza Total | 5 | mg/L | Frasco 500 mL com H ₂ SO ₄ até pH < 2 (4) | 6 meses |
| Flow Injection Analysis (FIA) | Fenóis Totais | 0,001 | mg/L | Mesmo (4) | 14 dias |
| ICP-MS | Arsênio | 1 | µg/L | Frasco 500 mL com HNO ₃ até pH < 2 (5) | 6 meses, exceto mercúrio que é de 28 dias |
| | Bário | 1 | µg/L | | |
| | Boro | 1 | µg/L | | |
| | Cádmio | 1 | µg/L | | |
| | Cálcio | 50 | µg/L | | |
| | Chumbo | 1 | µg/L | | |
| | Cobre | 1 | µg/L | | |
| | Cromo | 1 | µg/L | | |
| | Ferro | 1 | µg/L | | |
| | Magnésio | 50 | µg/L | | |
| | Manganês | 1 | µg/L | | |
| | Mercúrio | 0,1 | µg/L | | |
| | Níquel | 1 | µg/L | | |
| | Potássio | 50 | µg/L | | |
| Sódio | 50 | µg/L | | | |
| Zinco | 1 | µg/L | | | |
| Espectrofotometria | Amônia (como NH ₃) | 0,1 | mg/L | Mesmo (4) | 14 dias |
| Gravimetria | Sólidos Dissolvidos Totais | 5 | µg/L | Mesmo (1) | 7 dias |
| GCMS | Benzeno | 1 | µg/L | 2 vials de 40 mL preservados com HCl (6 e 7) | 14 dias |
| | Etilbenzeno | 1 | µg/L | | |
| | m,p-Xilenos | 2 | µg/L | | |
| | o-Xileno | 1 | µg/L | | |
| | Tolueno | 1 | µg/L | | |
| Turbidímetro | Turbidez | 0,1 | NTU | Mesmo (1) | 48 horas |
| LCMSMS e GCMSMS | Agroquímicos | 0,1 | µg/L | Vidro âmbar | 14 dias |
| Radioatividade | Deutério (2H) | - | ‰ VSMOW | Frasco âmbar 1 L com HNO ₃ até pH < 2 (7) | 180 dias |
| Radioatividade | Estrôncio (87Sr/86Sr) | - | ‰ VSMOW | Mesmo (7) | 180 dias |
| Radioatividade | Oxigênio-18 | - | ‰ VSMOW | Mesmo (7) | 180 dias |
| Cintilação Líquida | Tritio | 833,3 | UT | Frasco âmbar 100 mL com HNO ₃ até pH < 2 | 180 dias |

4.2 Qualidade analítica dos dados

4.2.1 Avaliação dos parâmetros *in situ*

Foi realizada a avaliação dos parâmetros obtidos *in situ* mediante a comparação com os resultados obtidos em laboratório. Essa ação visa à escolha dos resultados considerados mais confiáveis para cada parâmetro, de modo a se ter, no final, um banco de dados hidroquímicos consolidado.

Foram determinados mediante sonda paramétrica os seguintes parâmetros: Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Condutividade Elétrica (CE), Potencial Hidrogeniônico (pH), Temperatura (T) e Potencial Redox/ORP.

Os Sólidos Totais Dissolvidos constituem a soma de todos os constituintes dissolvidos na água. As Figuras 4.15 a Figura 4.17 apresentam os resultados do STD, obtidos em três diferentes situações: mediante sonda de campo, determinação em laboratório pelo peso do resíduo seco da evaporação da amostra da água e através de cálculo (somatório de íons, conforme APHA, 2005, expresso na Equação 4.1), para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

$$STD = 0.6 * (alcalinidade) + Na + K + Ca + Mg + Cl + SO_4 + SiO_3 + NO_3 + F$$

(Eq. 4.1)

Analisando as referidas figuras, nota-se que medidas obtidas nas três situações mostram, no geral, um comportamento similar. Poucas amostras divergem desse padrão de comportamento. Os STD obtidos *in situ*, na maioria dos casos, apresentam os menores resultados, enquanto os maiores valores são verificados nas determinações realizadas em laboratório. Os valores obtidos através do cálculo, geralmente, apresentam resultados intermediários, quando comparado aos demais. No presente projeto optou-se por utilizar resultados correspondentes ao STD determinado em laboratório, levando em consideração que foi utilizado o método de gravimetria (Tabela 4.5), portanto, mais confiáveis se comparados com os valores medidos *in situ* e os determinados por cálculo.

O STD medido *in situ* é estimado através da conversão da medida de condutividade elétrica, em que o valor de CE medido é multiplicado por um fator de conversão que pode variar entre 0,54 e 0,96.

O STD calculado é obtido da Equação 4.1, que pode, entretanto, levar a erros se alguns elementos dissolvidos na água não tiverem sido devidamente determinados ou mesmo não foram determinados.

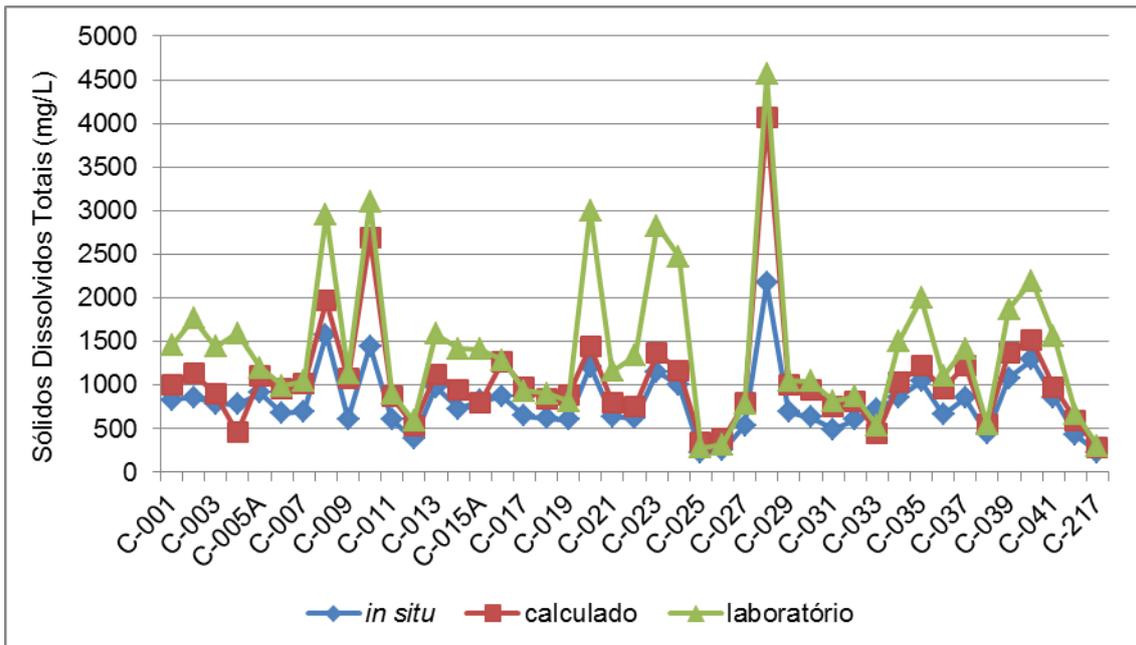


Figura 4.15 - Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Irecê – BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

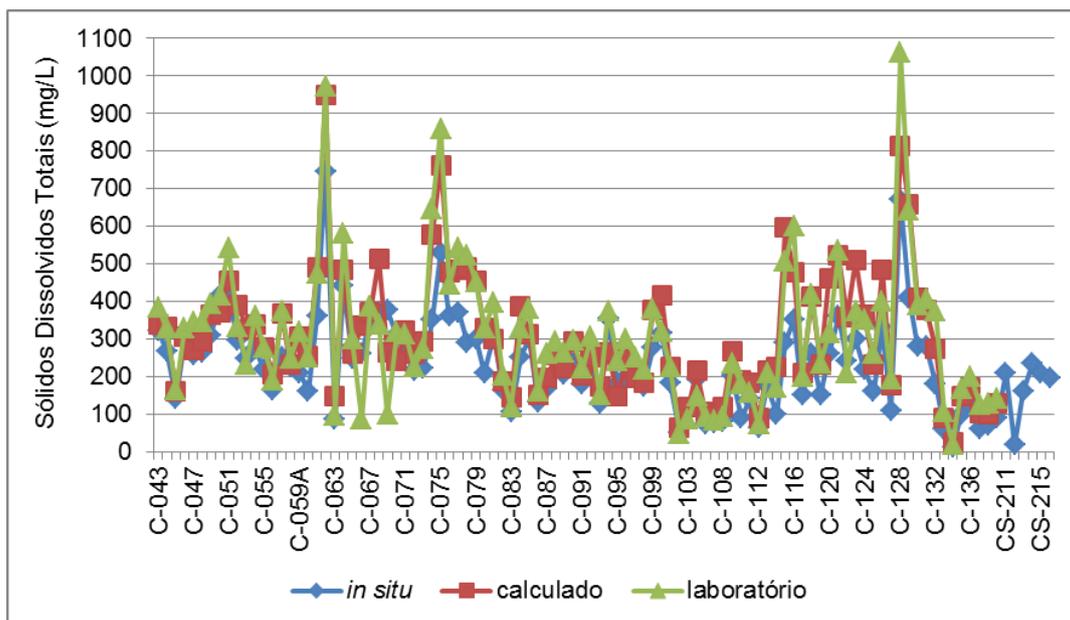


Figura 4.16 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional. Os parâmetros físico-químicos das amostras CS-211, CS-212, CS-213, CS-214, CS-215 e CS-216 (todas de águas superficiais) não foram analisadas em laboratório, sendo analisados apenas alguns parâmetros específicos.

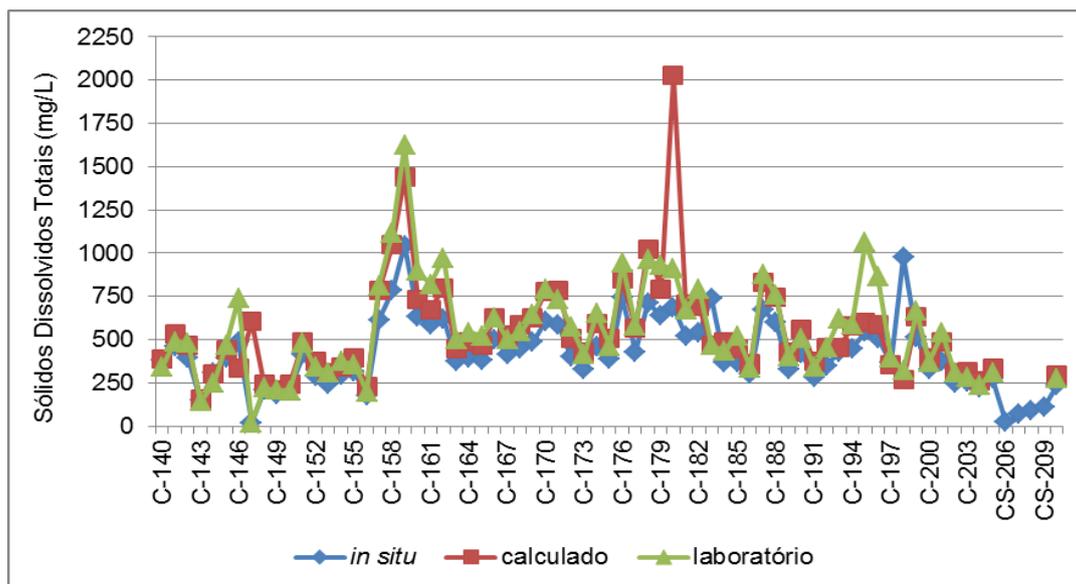


Figura 4.17 – Resultados dos Sólidos Totais Dissolvidos na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional. Os parâmetros físico-químicos das amostras CS-206, CS-207, CS-208 e CS-209 (todas de águas superficiais) não foram analisadas em laboratório, sendo analisados apenas alguns parâmetros específicos.

Os resultados da CE *in situ* e medido em laboratório para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério, estão mostrados nas Figuras 4.18 a Figura 4.20. A Condutividade Elétrica corresponde à capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica. Esta capacidade depende basicamente da presença de íons, da concentração total e da mobilidade.

Percebe-se que os resultados medidos, em ambas as situações, demonstram que as medidas são similares, salvo algumas poucas exceções. Nesse estudo serão utilizadas as medidas *in situ*, pois o resultado mais confiável de medida de condutividade elétrica é aquele obtido no momento da coleta das amostras de água, já que medidas posteriores podem fornecer valores diferentes, principalmente se houver mudança de temperatura, escape de gases ou formação de precipitados. Além dessas variáveis, fatores outros afetando a composição da fração dissolvida e da fração em suspensão, na amostra, podem contribuir para alterar as medidas de CE. Dentre esses fatores citam-se o acondicionamento e transporte e o tempo de armazenamento das amostras no laboratório.

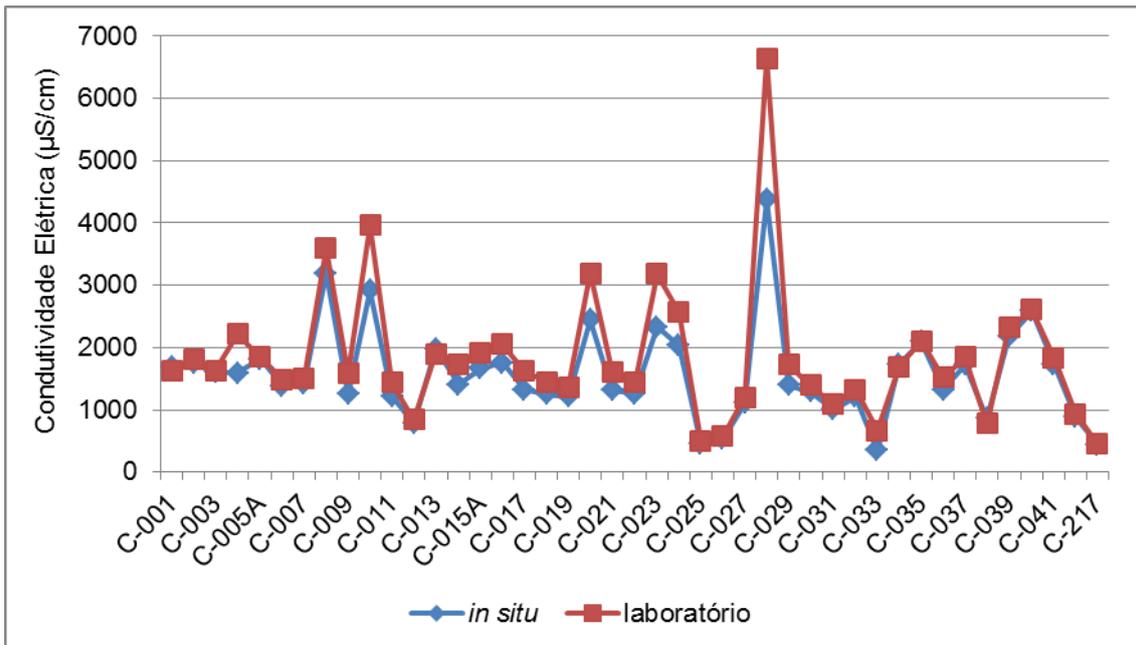


Figura 4.18 - Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de Irecê - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

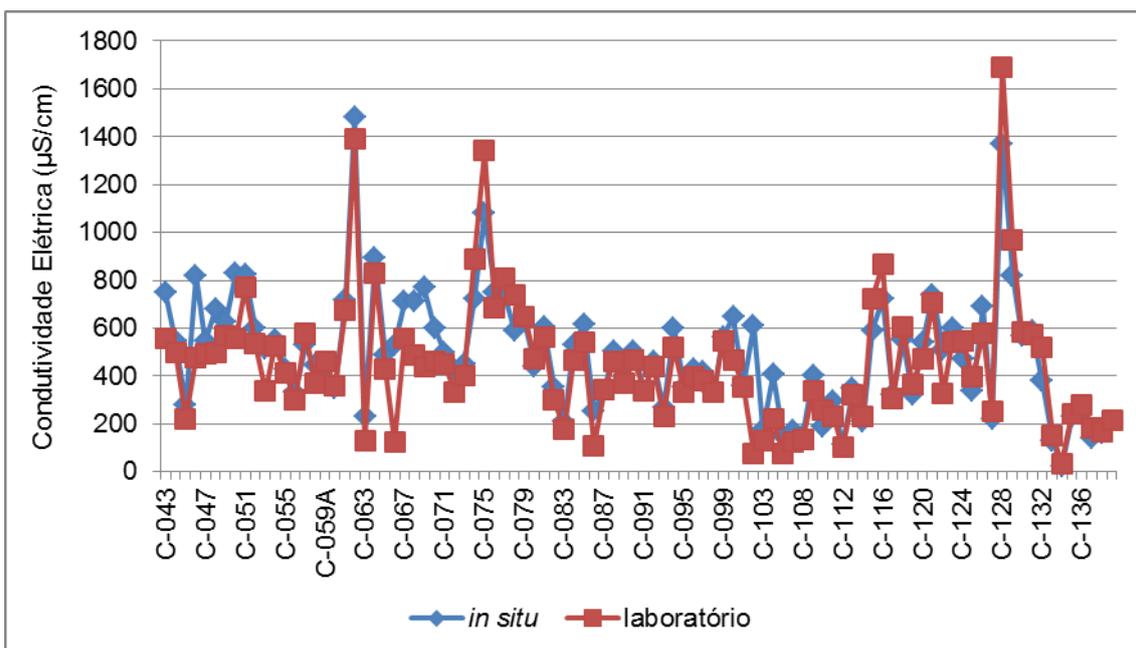


Figura 4.19 – Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de Montes Claros - MG, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

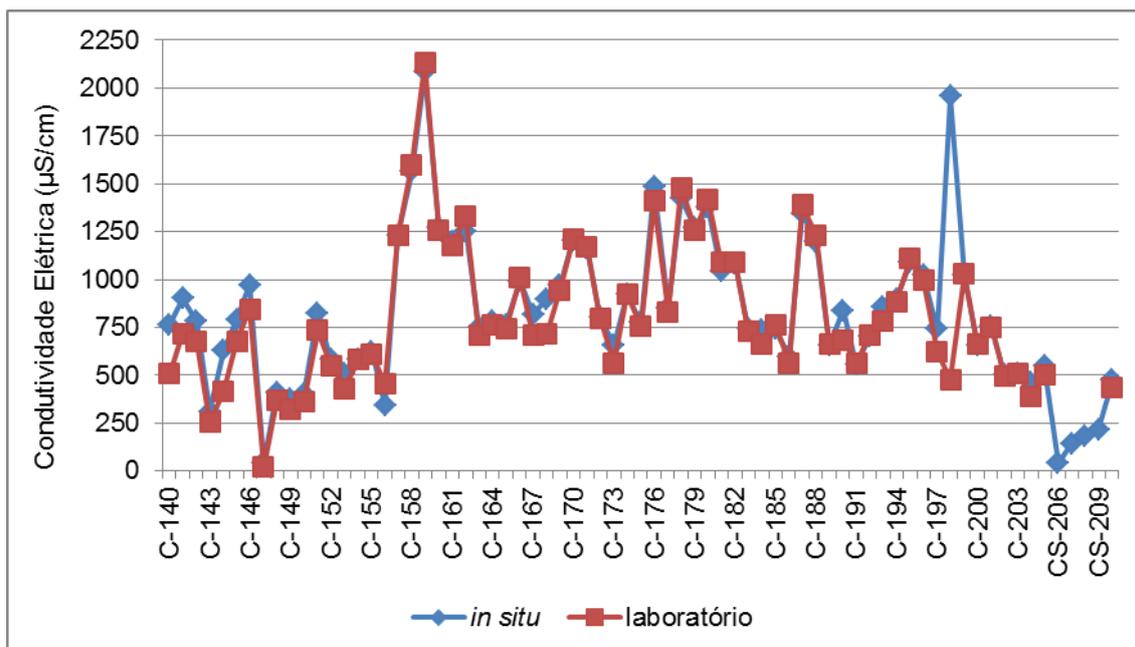


Figura 4.20 – Resultados de Condutividade Elétrica (CE) na região de São Desidério - BA, englobando as amostras de água da área piloto e regional.

Com relação aos outros parâmetros medidos *in situ*, como o pH, ORP e temperatura, o laboratório não efetuou as medidas. Entretanto, tal fato não prejudica o desenvolvimento da interpretação, pois serão utilizados os dados obtidos *in situ*, os quais são mais confiáveis, e as medidas de laboratório teriam apenas um cunho comparativo com as medidas realizadas no momento da coleta. As determinações de pH, ORP e T devem ser preferencialmente realizadas no local de coleta. Medidas em laboratório podem fornecer valores bem diferentes dos valores medidos *in situ*, em função de fugas de gases, oxidações e/ou reduções e variações de temperaturas, a que estão sujeitas às amostras de água durante a sua coleta, armazenamento e transporte (Feitosa & Filho, 2008).

4.2.2. Cálculo do Balanço iônico

Antes de qualquer análise hidroquímica torna-se necessário a avaliação da qualidade dos resultados analíticos emitidos pelo laboratório. A avaliação do erro numa análise química completa de água pode ser estimada através do balanço de íons, em que a concentração total dos cátions deve ser aproximadamente igual à concentração total dos ânions, ambos expressos em meq/L. Dessa forma, o valor da desigualdade, expresso em percentagem, é definido como erro analítico (ou erro da análise).

APHA (2005) aponta que o somatório dos cátions e ânions (em meq/L) deverá equilibrar-se, porque as águas naturais são eletricamente neutras. O teste baseia-se na diferença percentual conforme definido pela seguinte equação:

$$(\%) \text{ diferença} = 100 * \left[\frac{\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions}}{\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions}} \right] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde: $\sum \text{cátions} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})$

$\sum \text{ânions} = \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{HCO}_3^-$

No geral, as principais causas de erros decorrem de uma escolha inadequada da técnica analítica, de falhas no procedimento amostral ou laboratorial, de um demasiado tempo de armazenamento ou da presença de outros íons não caracterizados em quantidades apreciáveis na água. Por outro lado, quando a água é pouco mineralizada, pequenas diferenças podem se tornar grandes, quando comparados com concentrações totais dos ânions e dos cátions (Appelo & Postma, 2006).

O limite percentual do erro de balanço varia de autor para autor. Schoeller (1962) e Weight (2000) admitem ideal o erro do balanço iônico inferior a 5% e, no entanto, valores até 10%, bastante comuns, são aceitáveis para que a análise possa ser considerada analiticamente correta (Feitosa & Filho, 2008; Hiscock, 2005).

Nesse trabalho a precisão dos resultados analíticos foi definida de acordo com os dados dos balanços iônicos. Conforme apresentado na (Tabela 4.13), foram estabelecidas três classes de precisão, ou seja, os balanços iônicos até 5% estariam precisos, os balanços iônicos entre 5% e 10% estariam aceitáveis e os balanços acima de 10% estariam imprecisos. No ANEXO 7 constam os resultados de erro no balanço iônico para todas as amostras de águas analisadas.

Tabela 4.13 - Classes de precisão, conforme a qualidade dos resultados.

| Classe de precisão | Erro de análise (%) |
|--------------------|---------------------|
| Impreciso | Acima de 10% |
| Aceitável | Entre 5% e 10% |
| Preciso | Até 5% |

De acordo com a Figura 4.21 para as áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério predominam resultados precisos e aceitáveis, ou seja, com erros analíticos no máximo iguais a 5%. Apenas uma amostra (C-102) da área de Montes Claros apresenta erro de análise acima de 10%, portanto, impreciso.

É provável que isso reflita a baixa concentração iônica dessa água (C-102 tem 47 mg/L de STD), que induz ao aumento do erro analítico. 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 (Feitosa & Filho 2008).

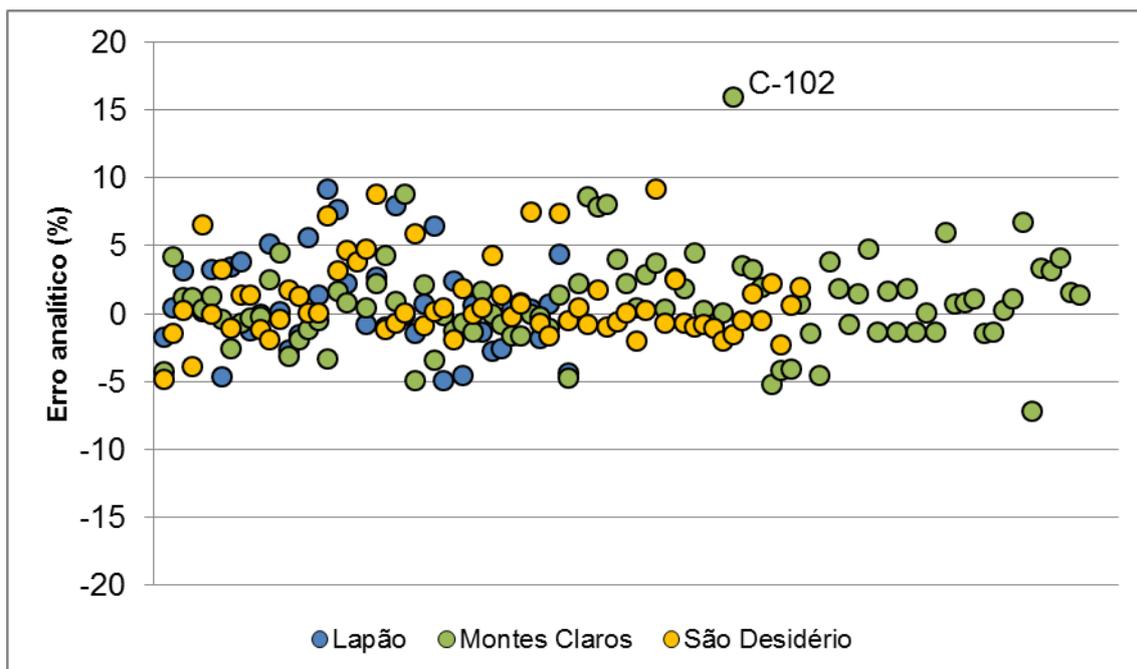


Figura 4.21 – Percentual de erro no cálculo do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

Em termos percentuais (Figura 4.22), isso traduz que no universo de 206 amostras coletadas, distribuídas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério, 186 amostras (90,3 % do total) apresentaram balanço iônico com erro menor que 5%, portanto, são análises precisas. Com erros entre 5% e 10% estão 19 amostras, que correspondem a 9,2% do conjunto e podem ser classificadas como análises aceitáveis. Apenas uma amostra (0,5%) apresentou erro acima de 10%, representando uma análise imprecisa, conforme as classes de precisão definidas na Tabela 4.6. Considerando que a referida amostra (com erro superior a 10%) é caracterizada por uma baixa concentração iônica, o que pode induzir ao aumento no erro analítico, ela não será descartada do conjunto de análises.

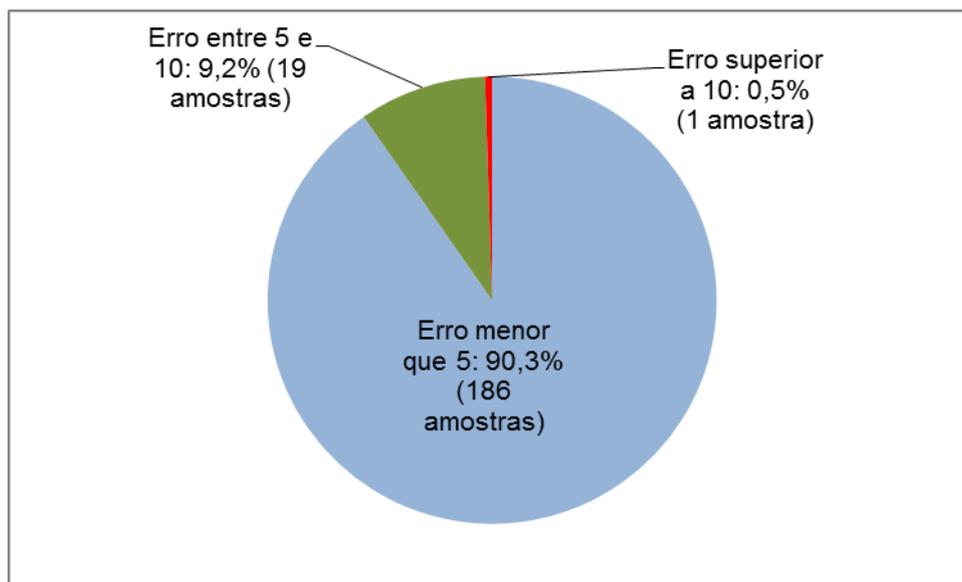


Figura 4.22 – Gráfico de representação percentual do balanço iônico, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério

A Figura 4.23 mostra a relação do erro analítico com a condutividade elétrica medidas *in situ*. Nota-se que os erros analíticos estão distribuídos de maneira compatíveis aos limites sugeridos por Custódio & Llamas (1983), conforme mostrado na (Tabela 4.14). Percebe-se que os erros até 5% ocorrem com maior frequência, para valores de condutividades elétricas próximo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esse comportamento está coerente com o fato dos erros menores se apresentaram associadas às maiores condutividades elétricas.

Tabela 4.14 - Erro admissível de balanço iônico a partir da condutividade elétrica (Custódio e Llamas, 1983)

| Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 50 | 200 | 500 | 2000 | >2000 |
|--|----|-----|-----|------|-------|
| Erro admissível (%) | 30 | 40 | 8 | 4 | 4 |

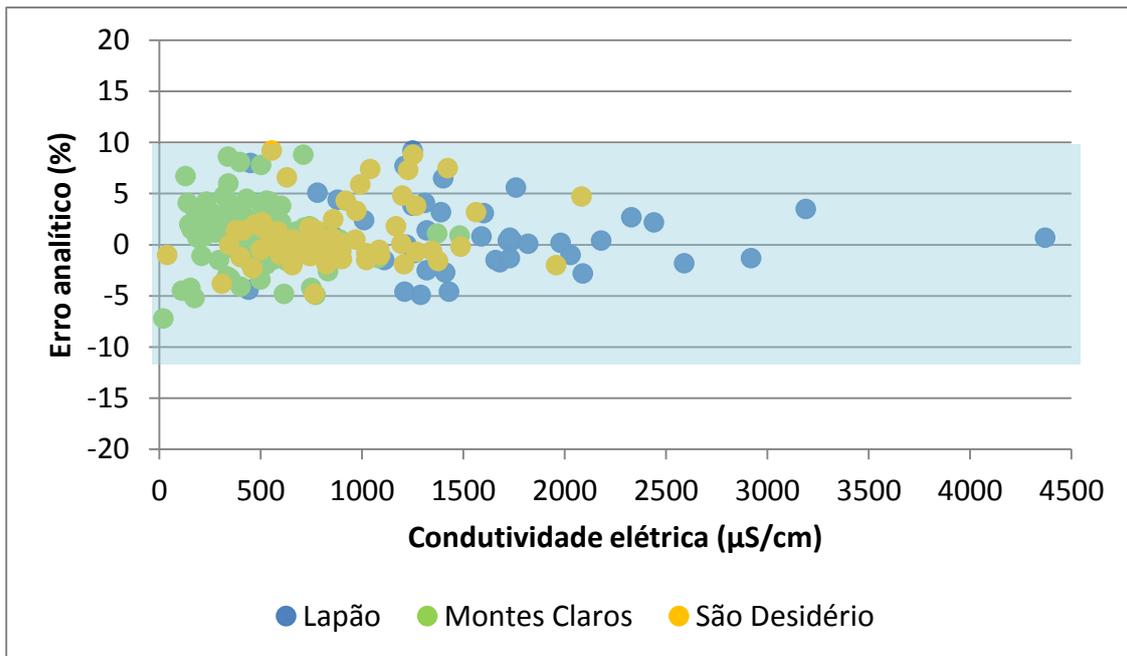


Figura 4.23 – Relação da condutividade elétrica medida *in situ* com os erros analíticos, englobando todas as amostras de água coletadas nas áreas de Irecê, Montes Claros e São Desidério.

5. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 1 - Irecê

Na avaliação hidrogeoquímica das amostras de água subterrânea da regional de Irecê foi realizada, primeiramente, uma análise dos perfis litológicos e construtivos dos poços amostrados. De acordo com essa análise, se conclui que os poços amostrados apresentam características hidrogeológicas semelhantes dentro de um contexto cárstico carbonático.

A caracterização hidrogeoquímica desse aquífero na área regional de Irecê, 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 4.24 apresenta a localização das amostras dentro do contexto geológico. Nota-se que os poços estudados estão inseridos na Formação Salitre, com suas respectivas unidades, sendo que as águas são captadas do aquífero homônimo, com exceção da amostra C-217 situada nos quartzitos Morro do Chapéu. Salienta-se que as amostras C-030, C-30 A, C-031, C-032,

C-033, C-034, C-035, C-036, C-037, C-038, C-039, C-040, C-041, C-042 e C-217 estão localizadas na área piloto do riacho do Juá e os demais estão distribuídos na área regional de Irecê, Figura 4.24.

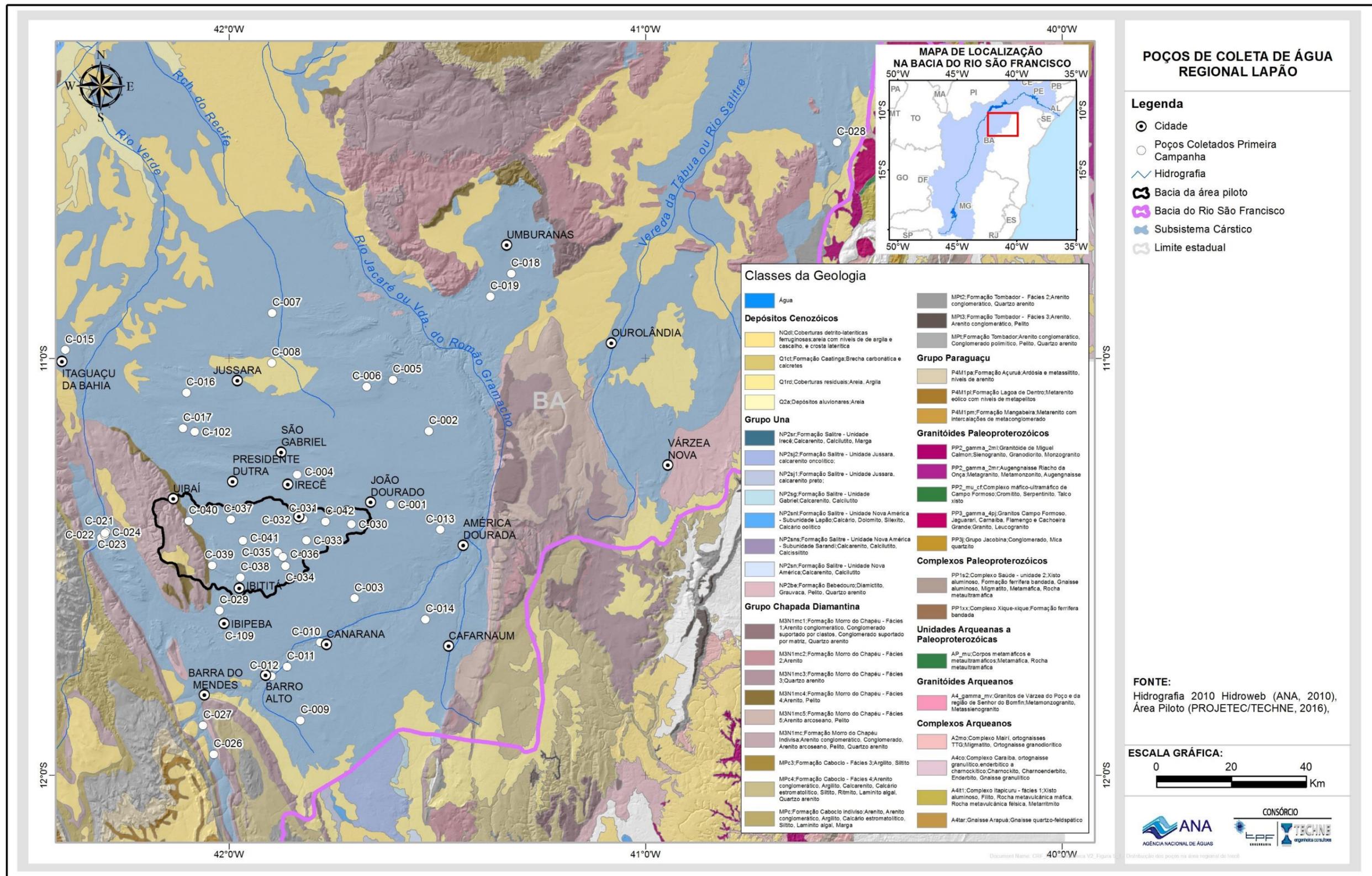


Figura 5.24 - Distribuição dos poços na área regional de Irecê.

5.1 Estatística Descritiva

As características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas possuem variações condicionadas por fatores diversos, como geológicos/hidrogeológicos e sazonalidade climática da região. 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 5.15) e na (Tabela 5.16). São apresentados os valores dos parâmetros mínimo, máximo, médias, medianas, desvio padrão, coeficiente de variação e amplitude.

Tabela 5.15 – 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 5.16 – 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 CaCO₃) | 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 CaCO₃) | 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 NH₃) | 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=Coeficiente 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 condutividade elétrica, nos dois períodos de coleta, foram superiores a 350 µS/cm. No período seco os valores da condutividade elétrica variaram de 550 (C-025) a 5140 µS/cm (C-028), com média de 1797,19 µS/cm (Tabela 5.15). No período úmido, (Tabela 5.16), ocorreu uma leve diminuição da mineralização dessas águas, com valores variando de 350 (C-033) a 4370 µS/cm (C-028), e média de 1604,53 µS/cm. É no período seco, portanto, que os teores em sais minerais dissolvidos na água são mais elevados porque a circulação da água é mais lenta, o que favorece a interação água/rocha contribuindo para o enriquecimento dessas águas.

Os valores de STD nas amostras de águas subterrâneas, analisadas 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 5.15) e, no período úmido os teores alteraram de 282 mg/L (C-025) a 4564,0 mg/L (C-028), com média de 1526,12mg/L (Tabela 5.16). Nota-se que o comportamento do STD, na área, assemelha-se ao da condutividade elétrica (CE), registrando, também, teores mais elevados no período seco.

No mapa de distribuição dos STD para o período seco (Figura 5.25), 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 Ourolândia (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.

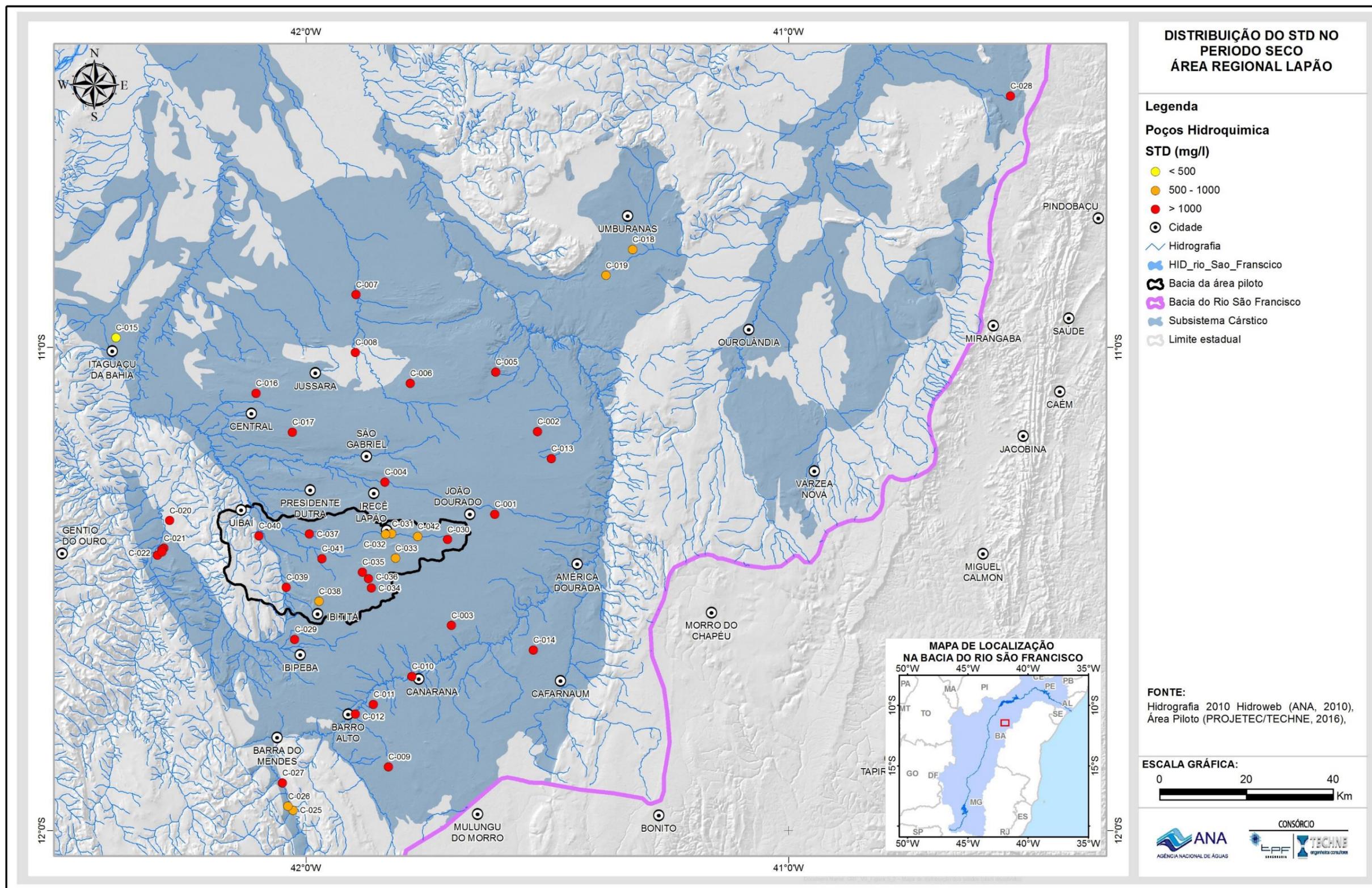


Figura 5.25 – Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período seco na regional de Irecê.

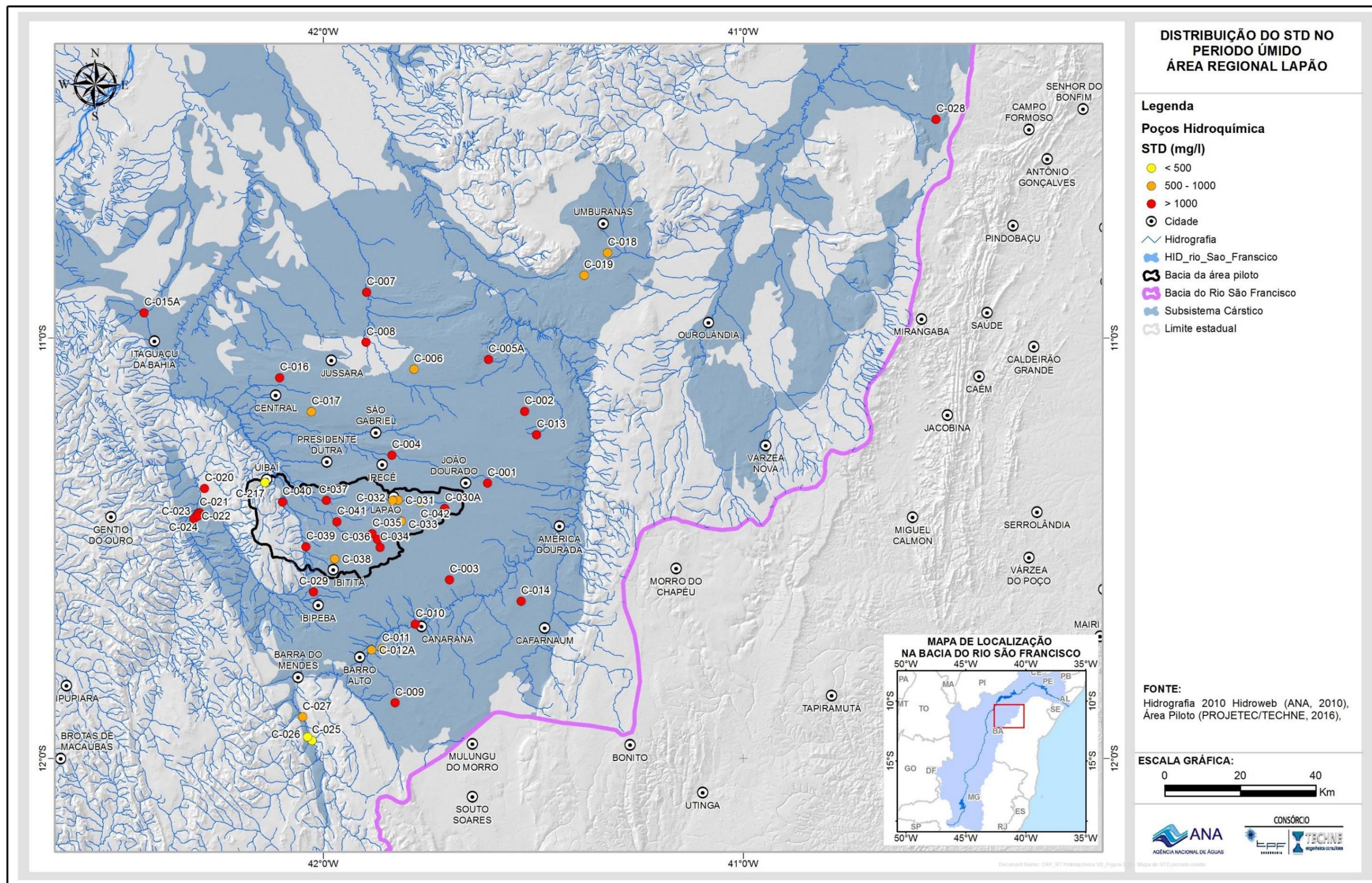


Figura 5.26 - Mapa de distribuição dos sólidos totais dissolvidos (STD) no período úmido na regional de Irecê.

A distribuição dos STD para o período úmido segue a mesma tendência do período seco, não evidenciando, portanto, mudanças significativas entre os períodos (Figura 5.25 e Figura 5.26). Os maiores teores, acima de 1000 mg/L, são dominantes e estão distribuídos de forma aleatória na área, sem seguir, portanto, uma localização preferencial. Os teores entre os intervalos de 500 a 1000 mg/L, estão representados pelos poços C-006, C-011, C-12A, C-017, C-018, C-019, C-027, C-031, C-032, C-033, C-038 e C-042, localizados, principalmente, na parte sul e noroeste da área. Os teores menores do que 500 mg/L foram registrados nas amostras C-025 e C-026, localizadas no município de Barra do Mendes, onde a cobertura Cenozoica, constituída de areia com níveis de argila, cascalho e crosta laterítica, tem espessura expressiva, podendo contribuir de forma significativa na diluição das águas. A amostra C-217, também registrou um teor abaixo de 500 mg/L, sendo, portanto, representante das águas do quartzito da formação Morro do Chapéu, que possui teores de STD normalmente menores do que dos calcários.

Salienta-se que nos dois períodos sazonais evidencia-se uma tendência de diminuição dos teores de STD nas amostras localizadas na porção leste da área piloto, bem como na parte nordeste, próximo à região de Umburanas.

Em relação ao enriquecimento das águas subterrâneas da região de Irecê, nota-se que elas são controladas, 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 5.27 a Figura 5.29). 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.

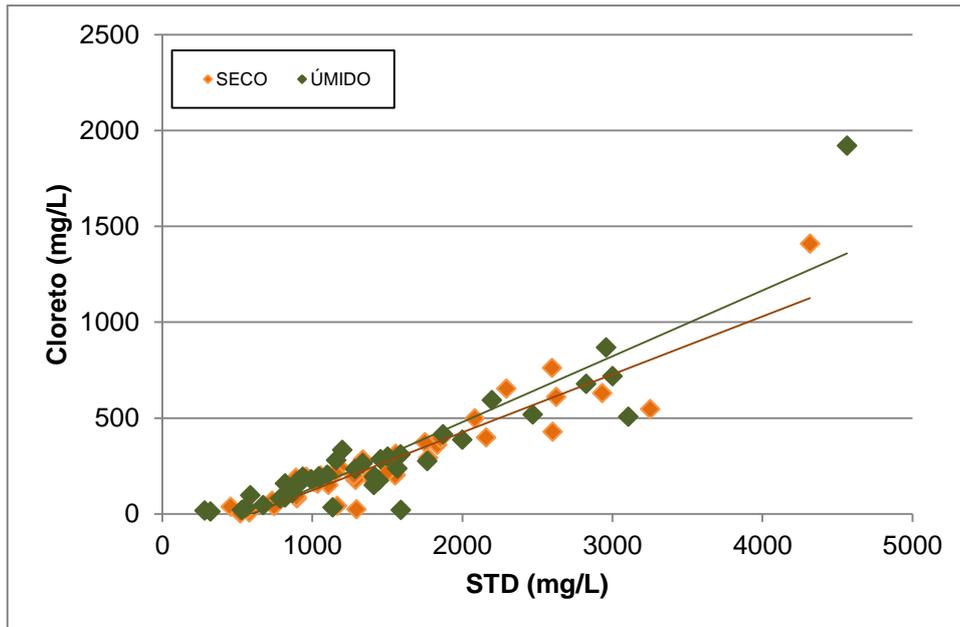


Figura 5.27 - Correlação entre STD e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

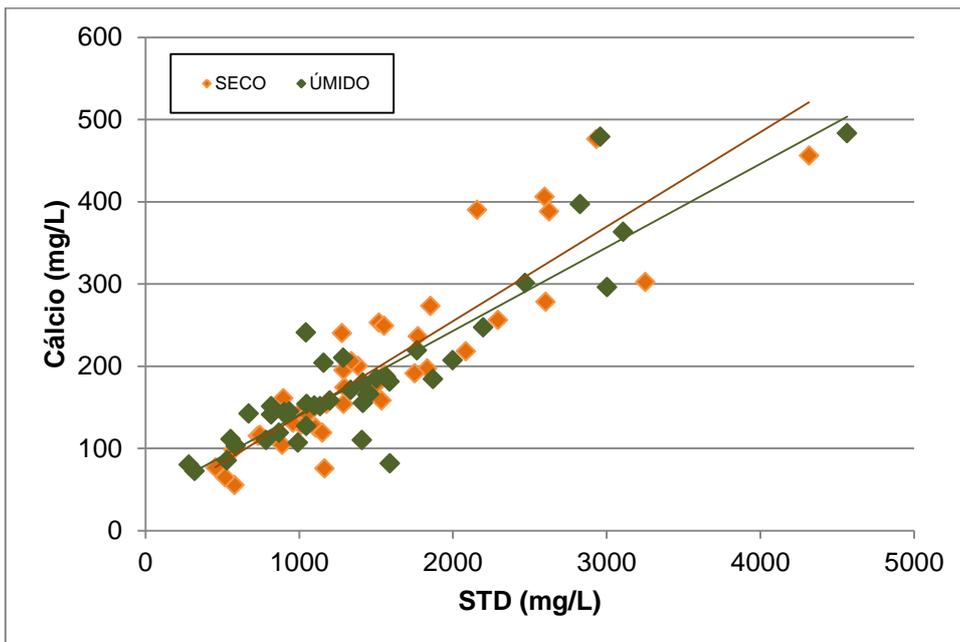


Figura 5.28 - Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

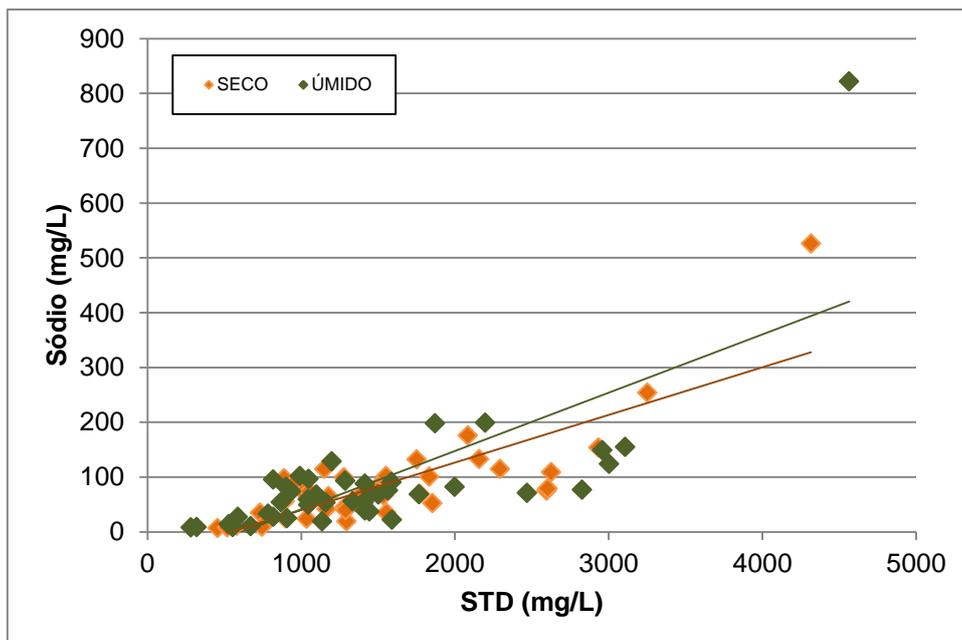


Figura 5.29 - Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

Tomando por base a classificação das águas subterrâneas em função da concentração de STD, conforme McNeely et. al. (1979) (Tabela 5.17), 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 5.17 - 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 |

Os valores de temperatura nas amostras de água da área, no período seco, variaram de 25 °C (C-002, C-006, C-007, C-008, C-017, C-011, C-012, C-013, C-014, C-017, C-019, C-020, C-022, C-024, C-025, C-029, C-033, C-038) a 29,60 °C (C-018), com média de 25,85 °C, enquanto no período úmido

variaram de 25°C (C-001, C-002, C-003, C-004, C-005A, C-007, C-010, C-012 A, C-013, C-014, C-015A, C-016, C-017, C-018, C-019, C-020, C-021, C-022, C-023, C-024, C-027, C-028, C-30A, C-031, C-032, C-033, C-035, C-036, C-036, C-037, C-038, C-039, C-040, C-041, C-042) a 27,20°C (C-029), com média de 25,23°C. Observa-se que as temperaturas das amostras são semelhantes nos dois períodos sazonais (Tabela 5.1 e Tabela 5.2). Ressalta-se que a temperatura medida em campo não representa o valor real da água do aquífero, mas equivale à temperatura da água no interior do poço. Dessa forma, acredita-se que a variação de temperatura aqui evidenciada não influencia o comportamento do CO₂ dissolvido nessas águas e, também não reflete no teor de cálcio, já que para acontecer escape de CO₂ e precipitação de CaCO₃ seria necessário um aumento mais forte da temperatura da água do aquífero.

A (Tabela 5.15) 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 5.16) 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 5.30). Enquanto que no período úmido (Figura 5.31), com a entrada do CO₂ proveniente da precipitação pluviométrica as águas tornam-se levemente ácidas a neutras (pH entre 6,5 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.

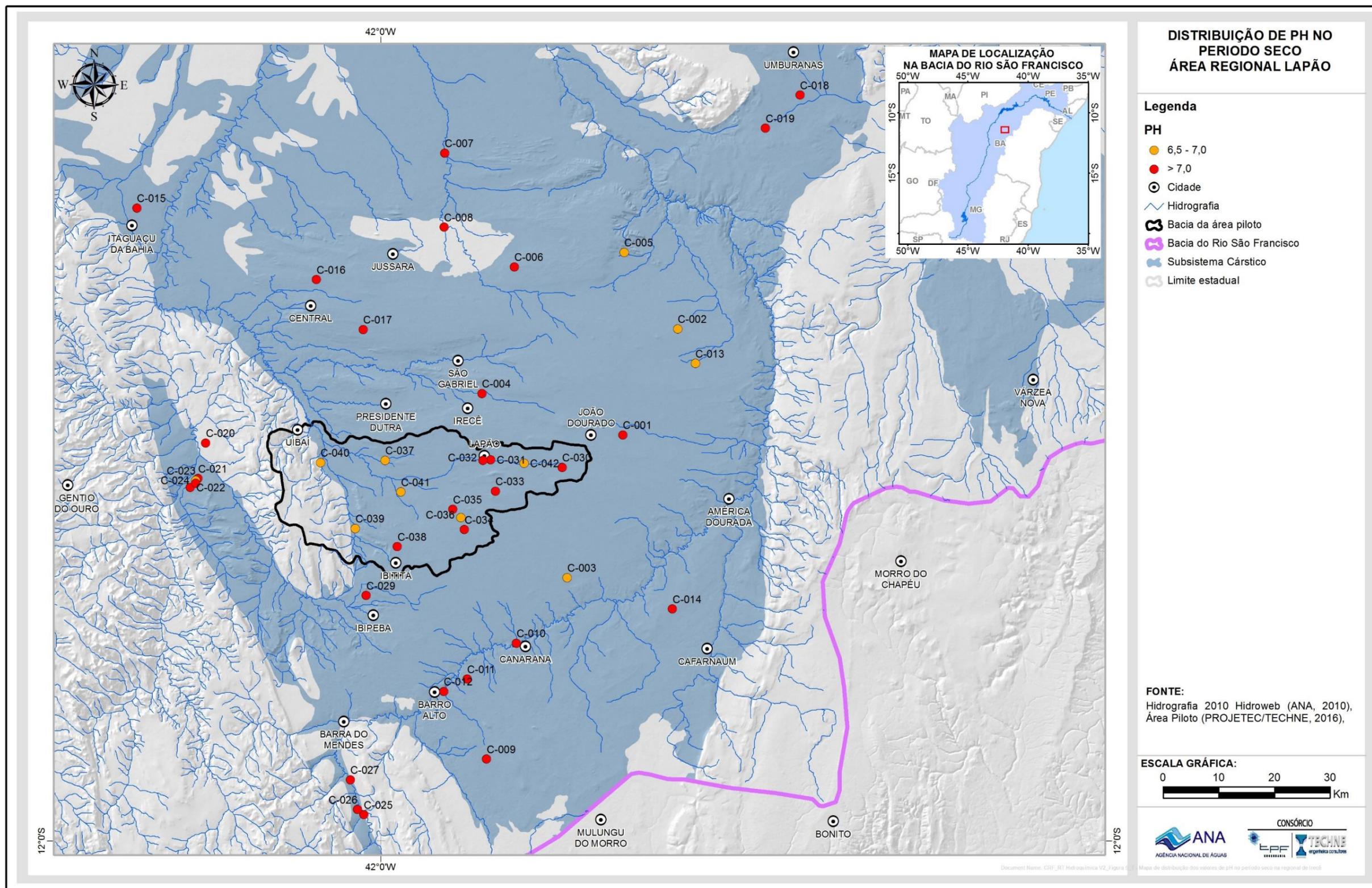


Figura 5.30 - Mapa de distribuição dos valores de pH no período seco na regional de Irecê.

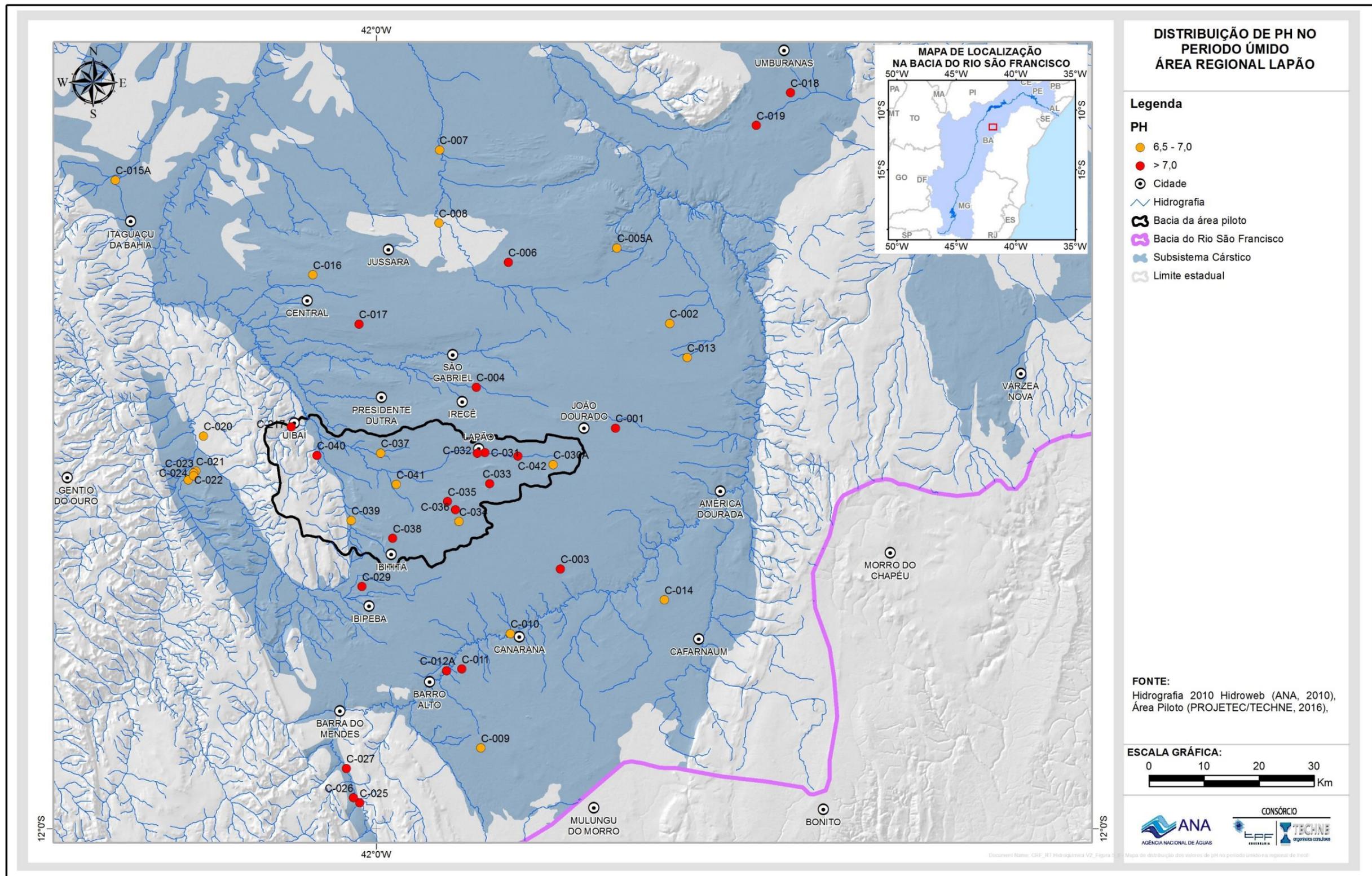


Figura 5.31 - Mapa de distribuição dos valores de pH no período úmido na regional de Irecê.

Com relação aos íons maiores, entre os cátions, o cálcio se destaca nas amostras analisadas, em função da litologia do calcário da Formação Salitre, com ocorrência em toda a área. No período seco os teores variaram de 55,19 (C-025) a 476,0 mg/L (C-008), média de 200,15 mg/L, amplitude de 420,90 mg/L (Tabela 5.15), e de 72,20 (C-026) a 483,00 mg/L (C-028), média de 185,87 mg/L, amplitude de 410,80 mg/L no período úmido (Tabela 5.16).

As Figura 5.32 e Figura 5.33 mostram os mapas de distribuição do cálcio, para os dois períodos sazonais. Nota-se que no período seco os teores de cálcio estão relativamente mais elevados, com os maiores teores, acima de 200 mg/L (C-002, C-005, C-008, C-010, C-014, C-020, C-023, C-024, C-028, C-034, C-036, C-037, C-039, C-040), com os poços (C-008 e C-023), inclusive, atingindo teores acima de 400 mg/L, concentrados, nas bordas oeste, nordeste e sudoeste. Os teores de cálcio entre 100 a 200 mg/L são predominantes e se distribuem em toda a área. Os menores teores de cálcio, abaixo de 100 mg/L, ocorrem de forma subordinada e localizados, próximos, principalmente, ao contato dos carbonatos do Grupo Una com as rochas de composições areníticas (C-015, C-024, C-026, C-027).

É importante destacar também que o padrão de distribuição do cálcio nas águas amostradas na área de estudo se assemelha ao padrão dos STD, comprovando assim que a contribuição efetiva da mineralização da água subterrânea da região do Irecê advém do cálcio. As variações dos teores de cálcio também estão condicionadas pela troca catiônica, exemplo dos poços (C-027, C-038), bem como pelos processos de carstificações atuantes na área.

O magnésio ocorre nessas águas em teores menores do que o cálcio. No período seco os teores obtidos variaram de 14,30 (C-026) a 241,0 mg/L (C-010), com média de 59,75 mg/L, enquanto que, no período úmido, ocorreram variações de 12,80 (C-025) a 244,00 mg/L (C-010), com média de 58,22 mg/L (Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente). É importante destacar que, em ambos os períodos de amostragem dois poços (C-010, C-028) mantiveram sempre teores acima de 100 mg/L, localizados respectivamente nos municípios de Canarana e Campo Formoso, podendo ser função da dissolução da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), muito frequente na área, relacionada sobretudo à Unidade Nova América Inferior, pertencente à Formação Salitre (Nossa, 2011).

Em relação aos outros cátions, o sódio sobressai em relação ao potássio, nos dois períodos de coleta. O sódio apresentou no período seco valores de 7,07 (C-015) a 526 mg/L (C-028), com média de 85,09 mg/L (Tabela 5.15), e no período úmido, as variações ocorreram no intervalo de 8,20 (C-025) a 822,00 mg/L (C-028), com média de 87,87 mg/L (Tabela 5.2). Os teores acima 100 mg/L de sódio ocorrem frequentemente nas porções norte e central norte da área de estudo (C-004, C-005, C-005 A, C-005, C-008, C-010, C-020, C-021, C-024, C-028, C-029, C-037, C-039 e C-040), enquanto os menores teores, abaixo de 30 mg/L (C-009, C-011, C-012 A, C-025, C-026, C-031, C-033, C-038 e C-042), estão mais presentes na parte sul da área. É importante destacar que o sódio participa do enriquecimento dessas, conforme já discutido anteriormente, quando se tratou do comportamento dos STD da região.

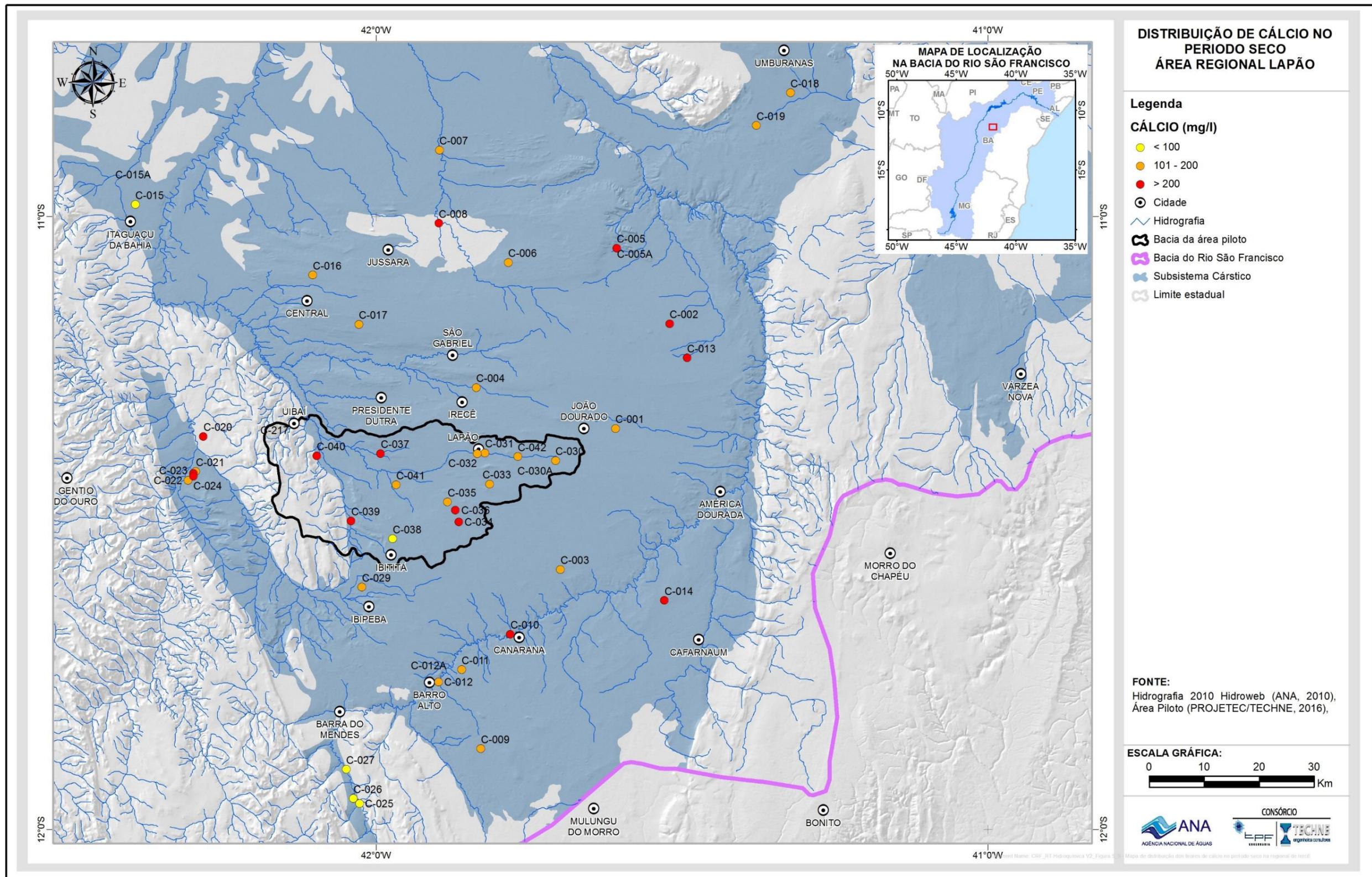


Figura 5.32 - Mapa de distribuição dos teores de cálcio no período seco na regional de Irecê.

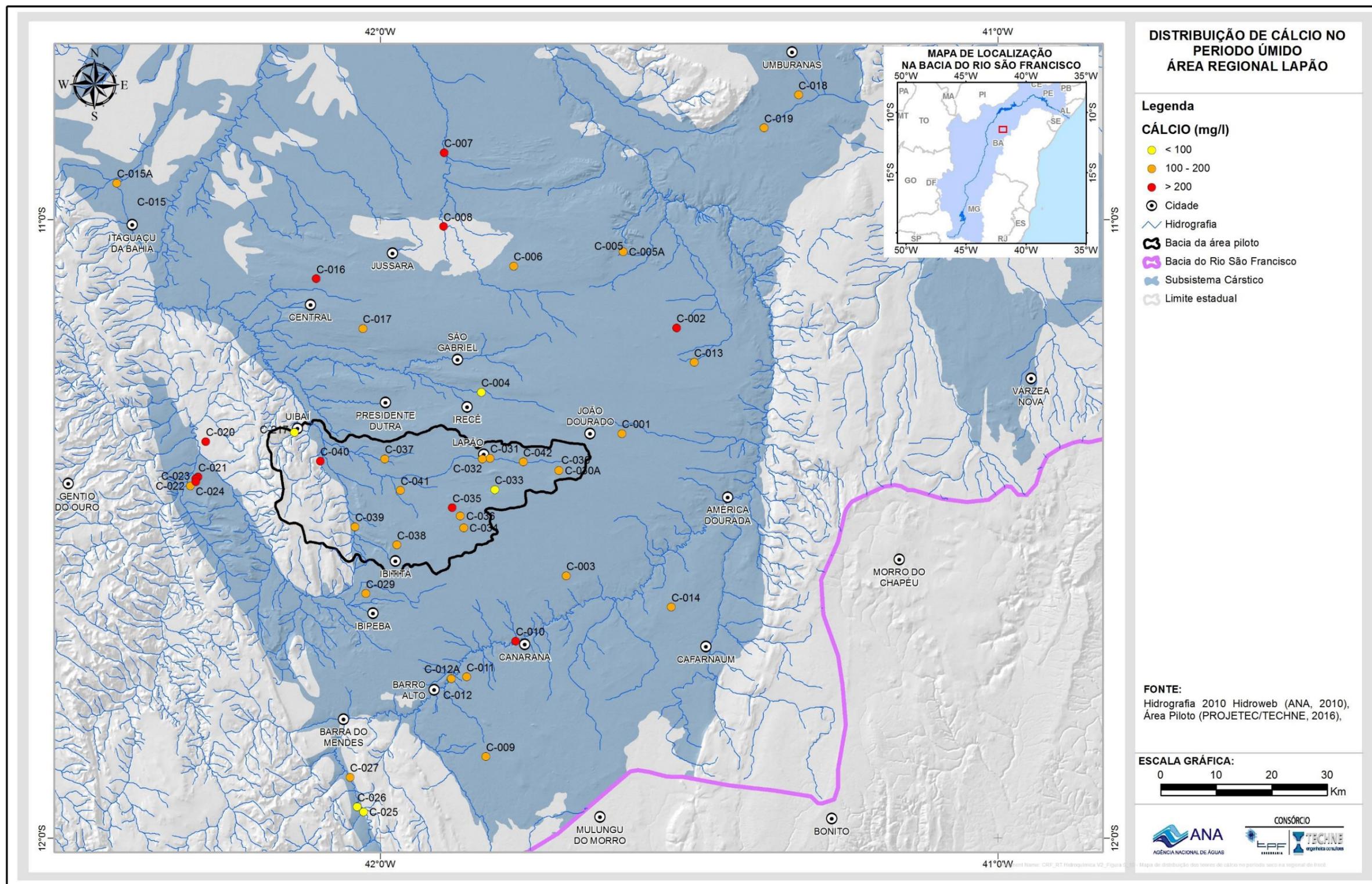


Figura 5.33 - Mapa de distribuição dos teores de cálcio no período seco na regional de Irecê.

Para os ânions, o bicarbonato se destaca devido, certamente, à litologia carbonática dominante na área. No período seco os resultados de bicarbonato demonstram que os teores variaram de 264 (C-022) a 516,00 mg/L (C-037), com média de 323,40 mg/L, e de 124 (C-049) a 519,0 mg/L (C-037), com média de 329,83 mg/L, no período úmido (Tabela 5.15 e Tabela 5.16).

As Figuras 5.34 e Figura 5.35 mostram os mapas de distribuição espacial dos teores de bicarbonato na região de Irecê. Nota-se que não houve variações expressivas entre os períodos sazonais, e em ambos os períodos dominam os teores entre 250 mg/L a 350 mg/L, com um certo predomínio na parte norte da área. Os teores mais elevados, acima de 350 mg/L, são mais expressivos no período úmido e estão localizados, principalmente, na porção leste da área piloto, sul, sudeste e norte na região de Irecê. Ressalta-se que os maiores teores de bicarbonato certamente estão concentrados na área onde existem maiores processos de carstificação e, geralmente, é acompanhado por valores de pH neutro a levemente básico (C-003, C-011, C-029, C-032, C-034). Por outro lado, os teores de bicarbonato mais baixos, menores do que 250 mg/L (C-022, C-025 e C-040), estão próximos do contato entre os carbonatos do Grupo Una e as rochas de composição mais arenítica, sugerindo interação entre as águas.

Salienta-se que o bicarbonato não participa de forma efetiva no processo de mineralização dessas águas. Isto é constatado quando se observa o comportamento dos resultados das amostras de bicarbonato em relação ao cloreto e STD, nos gráficos de dispersão das Figuras 5.36 e Figura 5.37, respectivamente. Observa-se que a distribuição das amostras nas duas situações é relativamente similar. A maioria das amostras se posiciona como uma nuvem de pontos sem nenhuma relação clara entre os pares de variáveis. Conclui-se, dessa forma, que o bicarbonato não mostra tendência de correlação nem com cloreto, nem com STD e, portanto, não contribui para a salinização dessas águas.

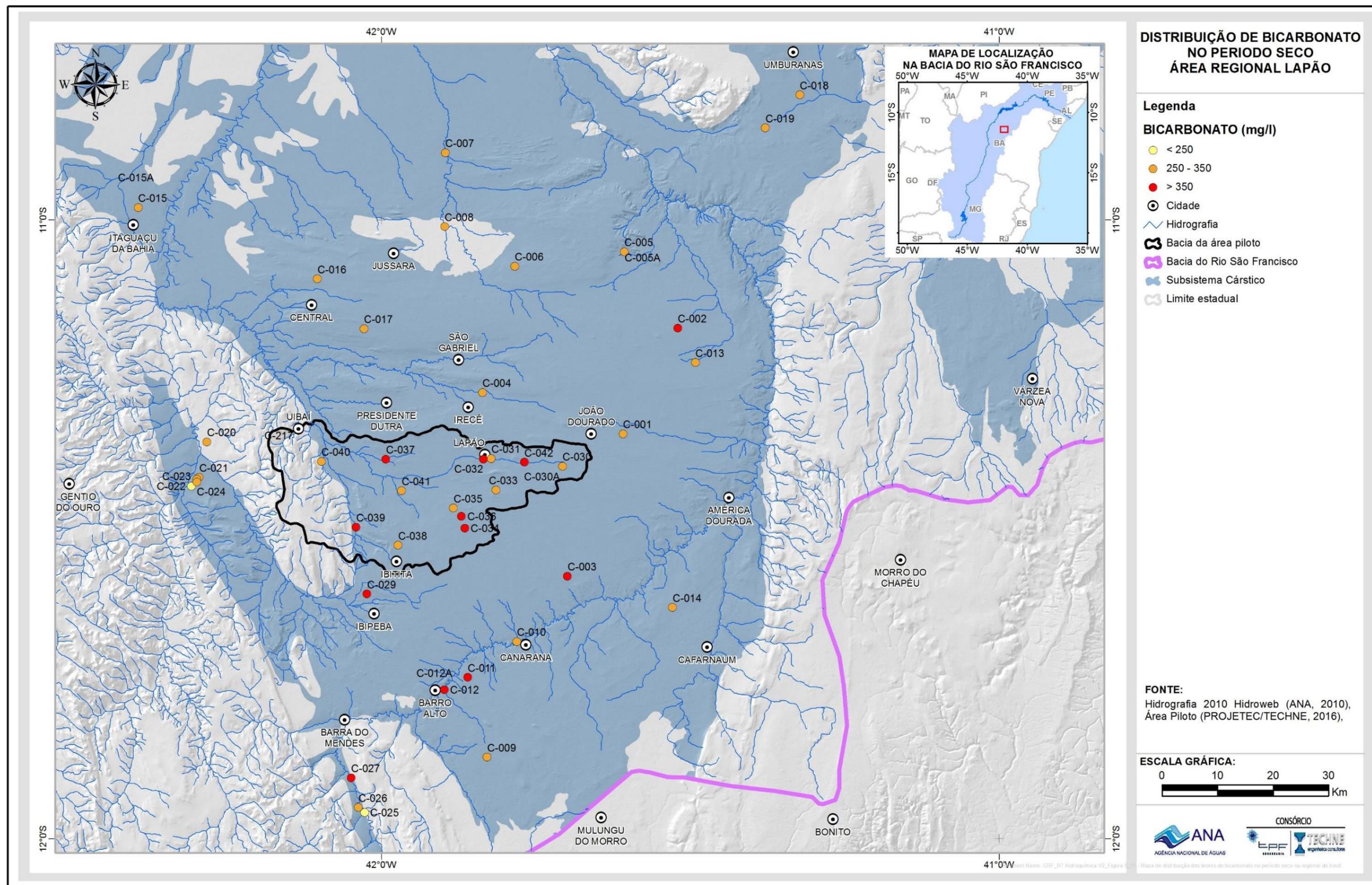


Figura 5.34 - Mapa de distribuição dos teores de bicarbonato no período seco na regional de Irecê.

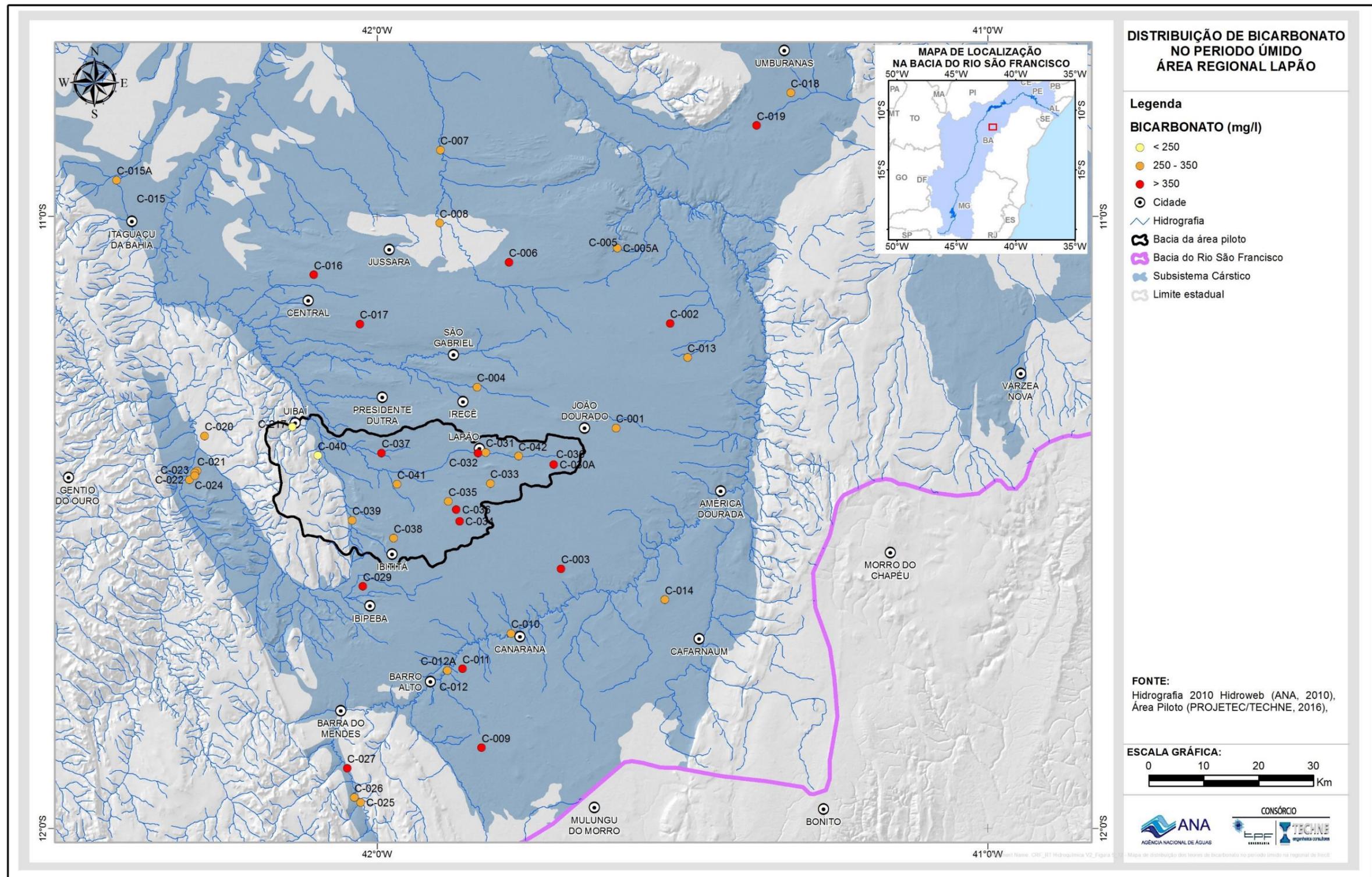


Figura 5.35 - Mapa de distribuição dos teores de bicarbonato no período úmido na regional de Irecê.

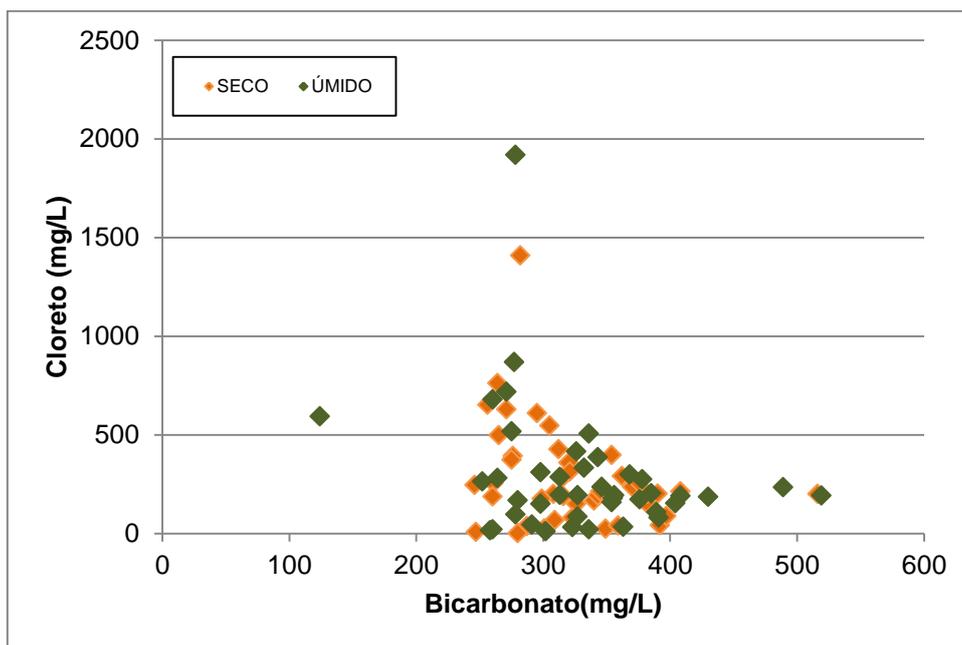


Figura 5.36 - Correlação entre bicarbonato e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

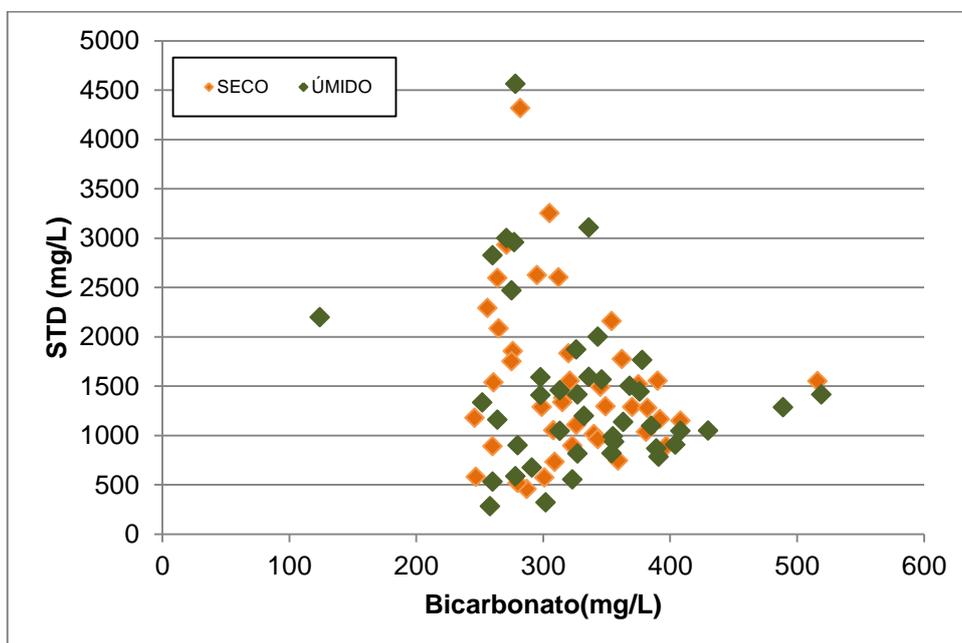


Figura 5.37 - Correlação entre bicarbonato e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

Os teores de sulfato obtidos nas águas subterrâneas da área se encontram, em grande parte das amostras, em teores baixos, variando de 1,06 (C-025) a 1140 mg/L (C-010), com média 153,39 mg/ no período seco e, no período úmido, os valores variaram de 1,24 (C-025) a 1260 mg/L (C-010), com média de 154,02

mg/L (Tabela 5.15 e Tabela 5.16). Localmente, alguns poços apresentaram teores acima 200 mg/L para sulfato (C-003, C-005 A, C-006, C-007, C-008, C-009, C-010, C-011, C-012, C-013, C-014, C-016, C-017, C-018, C-018, C-028, C-029, C-035, C-037, C-039, C-040 e C-042), inclusive com o poço C-010, no município Canarana, chegando ao teor de 1260 mg/L no período seco. Os teores das amostras, aparentemente, não estão somente condicionados aos aspectos sazonais pluviométricos, visto que parte dos teores de sulfato das amostras cresce no período seco e outra parte cresce no período úmido.

As espacializações do sulfato na área, para os dois períodos amostrais, estão ilustradas nas Figura 5.38 e Figura 5.39. Pode ser observado, nos dois períodos de amostragem, que existe certo predomínio de teores de sulfato menores do que 100 mg/L nas porções nordeste – central, sul e oeste-central da área, enquanto que os maiores teores de sulfato (> 200 mg/L) são encontrados na porção oeste, nas proximidades do aquífero poroso-fissural, e também nas porções norte, sudeste e extremo nordeste.

Os comportamentos dos teores de sulfato nessas águas, principalmente na porção centro - nordeste e leste da área podem estar relacionados ao fluxo da Bacia do Riacho do Juá, que nasce no Povoado de Gameleira, no município de João Dourado, acompanhando um padrão E-W e tem sua foz no município de Uibaí onde se encontra com o Riacho Vereda-Cana-Brava e vai até o Município de Ibititá cujo curso acompanha a direção N-S. Não se pode, também, descartar a contribuição litológica no enriquecimento das águas por sulfato, já que na região de Irecê é comum a presença de sulfetos metálicos, principalmente pirita, disseminados nos calcários (Guerra, 1986).

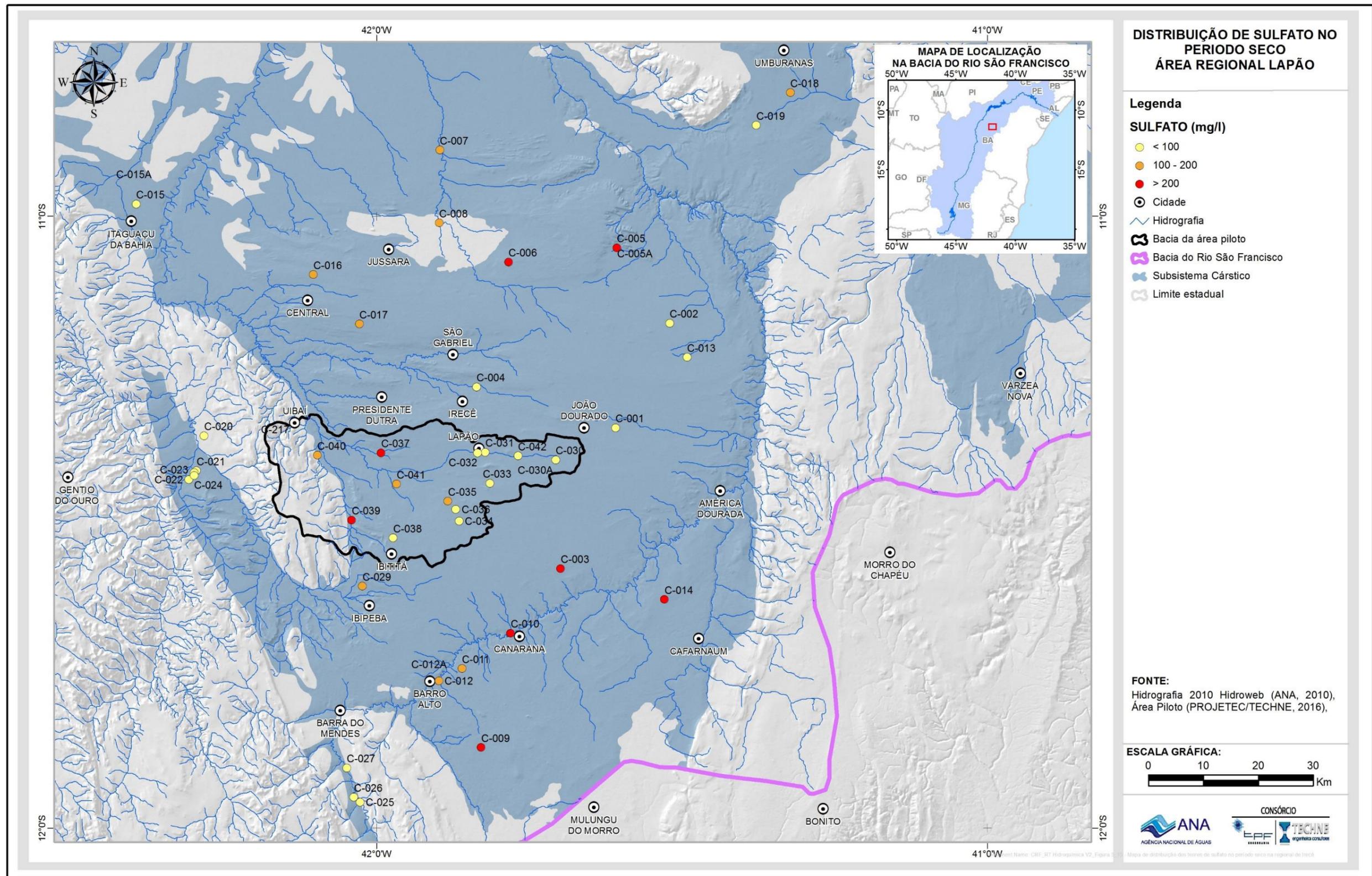


Figura 5.38 - Mapa de distribuição dos teores de sulfato no período seco na regional de Irecê.

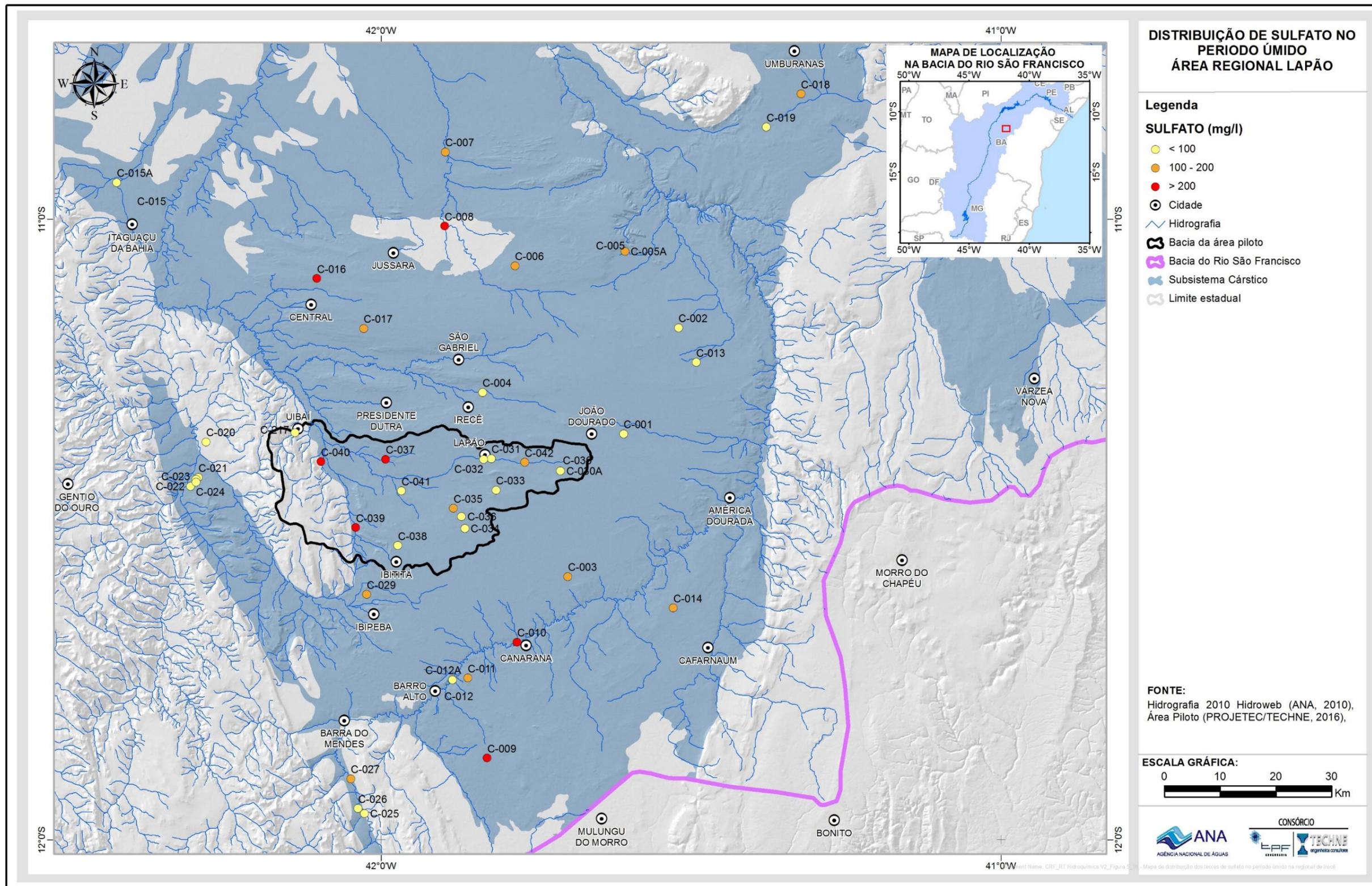


Figura 5.39 - Mapa de distribuição dos teores de sulfato no período úmido na regional de Irecê.

Outro ânion que se destaca nas águas subterrâneas na região de Irecê é o cloreto, variando de 2,38 (C-026) a 1410 mg/L (C-028), com média de 281,61 mg/L no período seco (Tabela 5.15). No período úmido, os teores variaram de 11,60 (C-026) a 1920 mg/L (C-028), com média de 286,22 mg/L (Tabela 5.1).

Nos mapas de distribuição de cloreto nas águas subterrâneas na região de Irecê (Figura 5.40 e Figura 5.41) nota-se que os teores de cloreto, na maioria das amostras, não mostram mudanças significativas entre os períodos amostrados. Nos setores centro-leste e sul da área estão concentrados os teores menores do que 100 mg/L, inclusive com poços (C-025, C-026), com teores abaixo de 30 mg/L nos dois períodos sazonais. Ao passo que os intervalos de cloreto de 100 e 300 mg/L são predominantes e ocorrem principalmente nas porções central e norte. Por outro lado, os maiores teores de cloreto (acima de 300 mg/L) se encontram na parte oeste da área, precisamente próximo ao contato entre os carbonatos da Formação Salitre e os quartzitos da Formação Morro do Chapéu. Com exceção do poço C-217, representante de água proveniente de água do quartzito, com teor de cloreto da ordem de 30 mg/L, no período úmido.

Esse comportamento do cloreto possivelmente está relacionado ao fluxo de água dentro do aquífero, ou seja, o fluxo principal das águas tem direção de leste para oeste da área. O poço C-035, situado na parte central, e os poços C-005, C-008, C-010, C-013 e C-028 posicionados nas partes norte e extremo nordeste da área, apresentam teores de cloreto acima de 300 mg/L. Não seguem, assim, a tendência geral, podendo corresponder a locais onde a circulação da água subterrânea é deficiente ou existe focos pontuais de contaminação Guerra (1986).

De acordo com Guerra (1986), o mecanismo de concentração de cloreto está diretamente relacionado à taxa de evaporação, ou inversa à taxa de infiltração, no caso de ambientes calcários, fortemente influenciados pela presença das formas de absorção cárstica.

Negrão (1987) também evidenciou que as principais fontes de cloreto nas águas subterrâneas na região de Lapão/Irecê, parece ser as próprias precipitações pluviométricas. Segundo o autor, tal afirmação está embasada no fato de que na composição química das rochas existentes na área (calcários e dolomitos) não haveria possibilidade da existência de minerais clorados.

Ainda de acordo com Negrão (1987), na região de Lapão/Irecê observa-se consideráveis concentrações de cloreto de sódio ao longo dos leitos secos dos riachos, principalmente, na porção norte da área. A origem desses depósitos superficiais de sais parece estar relacionada aos contínuos e prolongados processos de precipitação – evaporação de sais, tanto nas superfícies quanto nas gretas e fissuras do calcário.

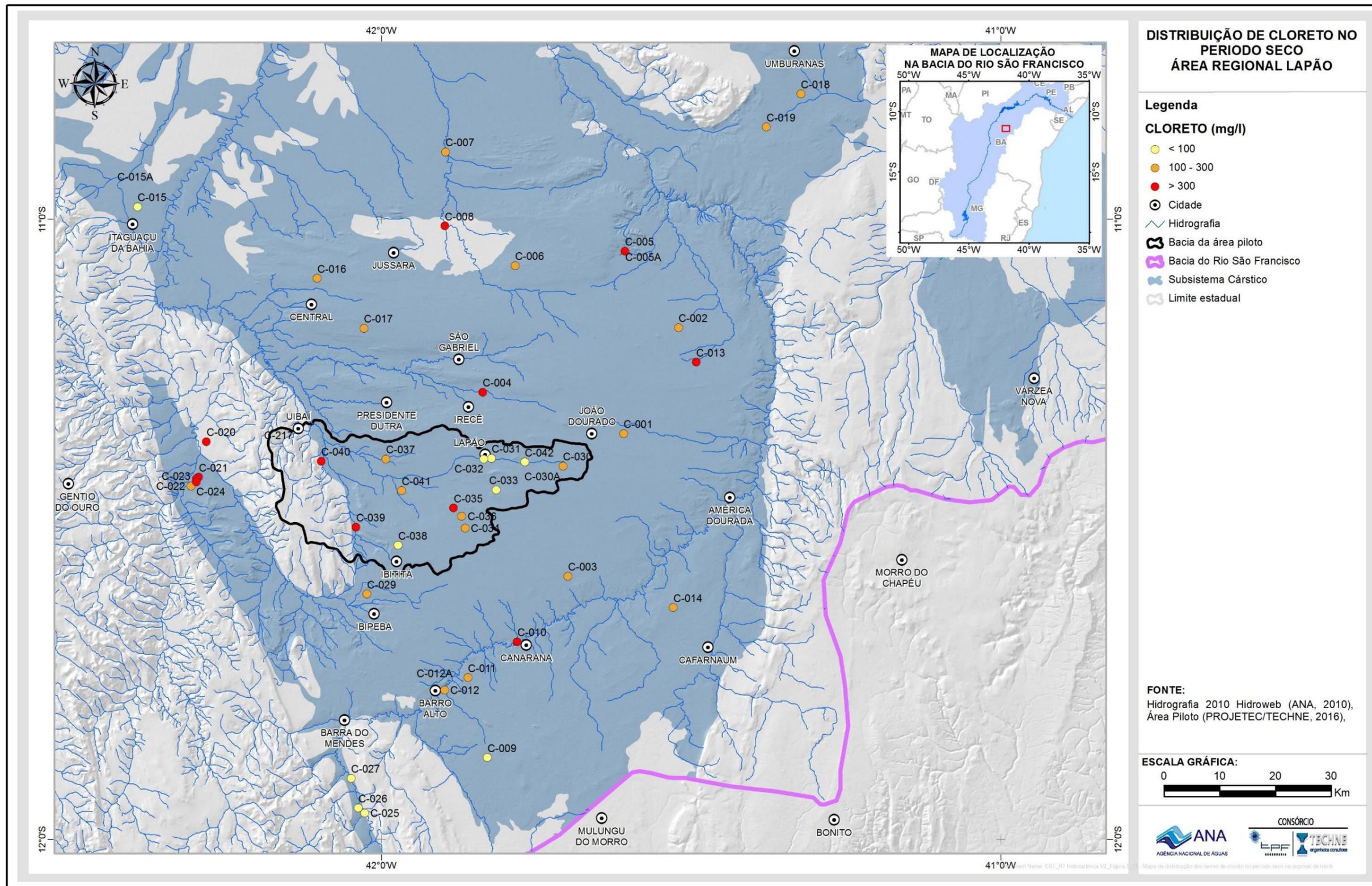


Figura 5.40 - Mapa de distribuição dos teores de cloreto no período seco na regional de Irecê.

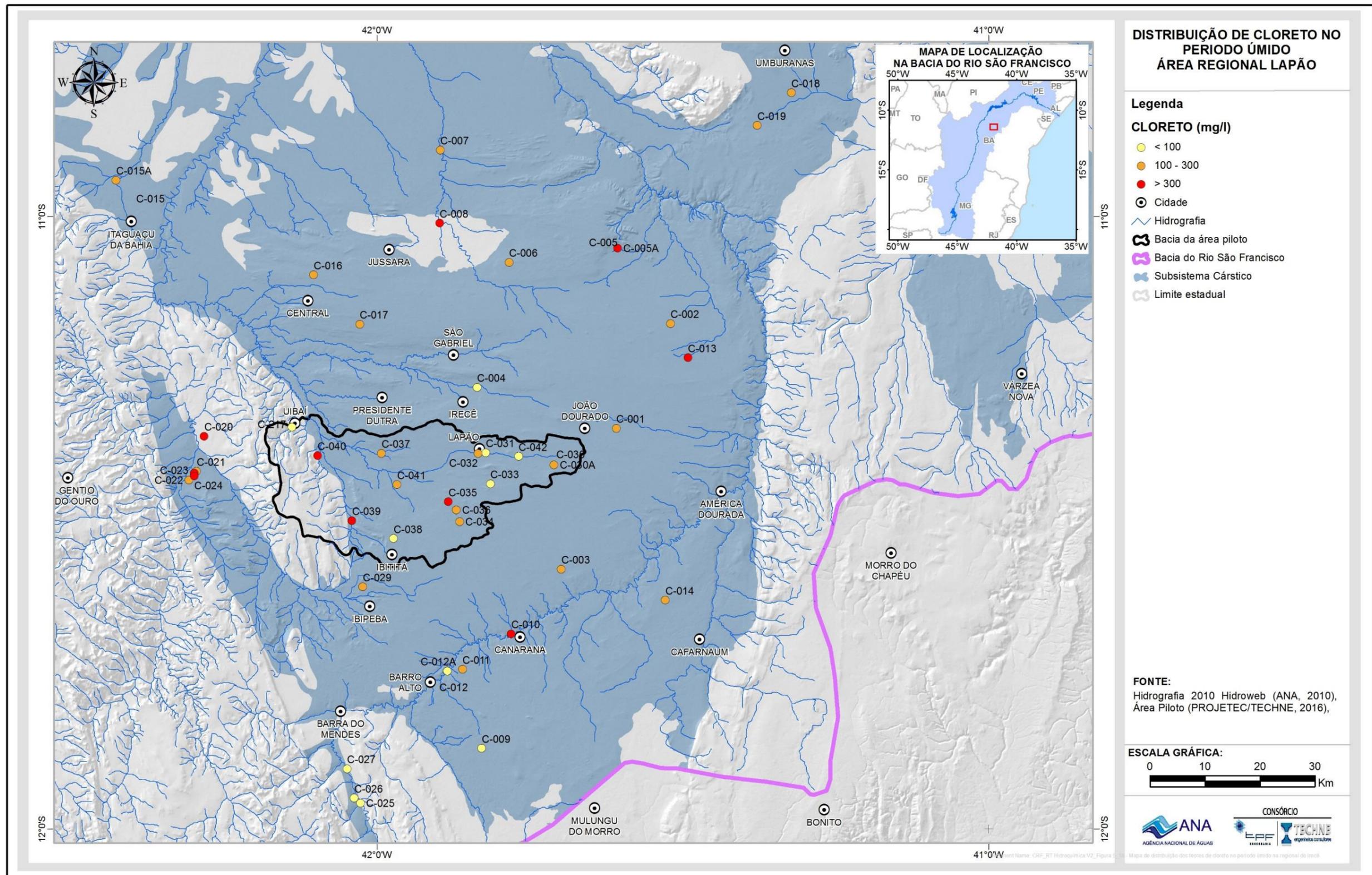


Figura 5.41 - Mapa de distribuição dos teores de cloreto no período úmido na regional de Irecê.

Com relação à possível contaminação antrópica, é possível verificar no gráfico de dispersão do cloreto com nitrato (Figura 5.42) que, a maioria das amostras apresenta, em geral, teores relativamente baixos de cloreto e discretas correlações positivas com nitrato, evidenciadas pelas linhas de tendências desenhadas no gráfico. Existe, portanto, uma tendência de correspondência positiva entre essas duas variáveis. Isso é perceptível observando que os valores mais elevados de nitrato (maior do que 10 mg/L) correspondem a teores de cloreto próximos ou superiores a 200 mg/L.

Os três maiores resultados para cloreto, por exemplo, revelam teores anômalos de nitrato: 869 mg/L cloreto correspondem a 30,5 mg/L nitrato; 1410 mg/L cloreto correspondem a 21 mg/L nitrato e 1920 mg/L cloreto correspondem a 21,1 mg/L nitrato. Assim, a presença de teores significativos de cloreto nesta água pode estar relacionada aos mecanismos climáticos, deficiência na circulação hídrica subterrânea ou, ainda, a possíveis focos esparsos de contaminação (Nossa, 2011). É importante destacar também que a distribuição de concentração do cloreto na área de estudo é coincidente com a distribuição dos STD, sendo responsáveis em parte pela salinização dessas águas na região de Irecê.

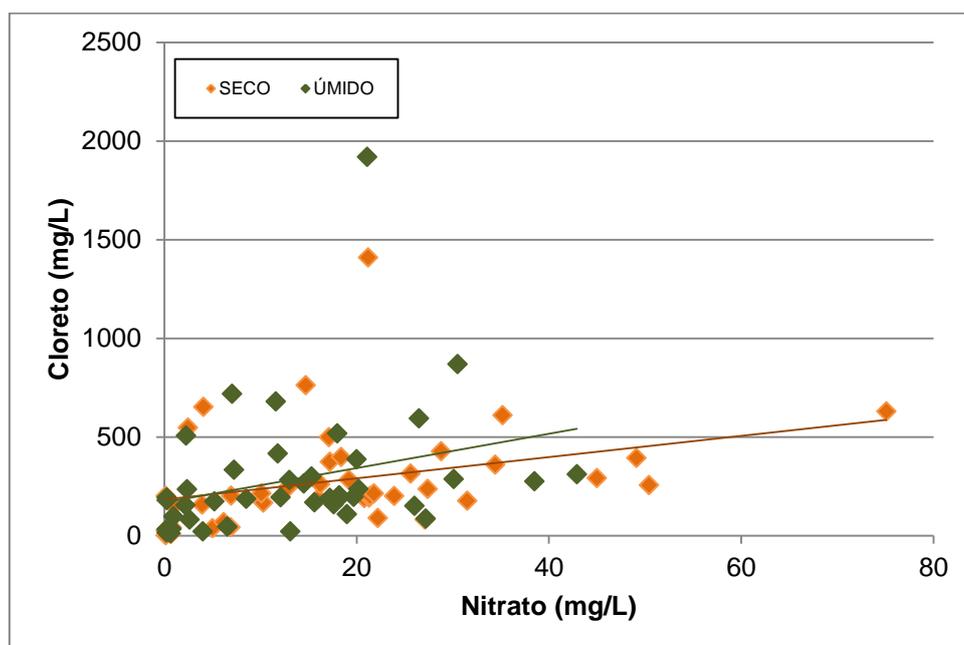


Figura 5.42 - Correlação entre nitrato e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

Dentre os constituintes secundários presentes nas águas subterrâneas na região de Irecê, o nitrato apresenta maior destaque. O nitrito e amônia ocorrem no limite de qualificação do método de análise. No período seco, o nitrato variou de 0,15 (C-026, C-037, C-038) a 75,10 mg/L (C-008), com média de 18,40 mg/L, enquanto no período úmido variou de 0,25 (C-006, C-025, C-037, C-038) a 42,90 mg/L (C-013), com média de 13,56 mg/L (Tabela 5.15 e Tabela 5.16). Nota-se que no período seco, os teores de nitrato estão levemente mais elevados do que no período úmido.

As Figura 5.43 e Figura 5.44 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, conforme já discutido anteriormente quando se interpretou o comportamento do cloreto na área. Na ocasião foi visto que parte da distribuição do cloreto está relacionada ao mecanismo de evolução da água no aquífero Salitre e uma parte menor, possivelmente, se relaciona ao crescimento nos teores de nitrato de origem antropogênica. O gráfico da Figura 5.42 mostra uma tendência de correlação positiva entre cloreto e nitrato, para teores mais elevados de nitrato (> 10 mg/L). Já o gráfico de dispersão (Figura 5.45) entre o nitrato e cálcio não tem correlação ou apenas mostra uma parcial e discreta correlação. Conclui-se, portanto, que a presença do nitrato nessa água tem forte relação com fatores inerentes à ocupação humana em detrimento aos processos litológicos.

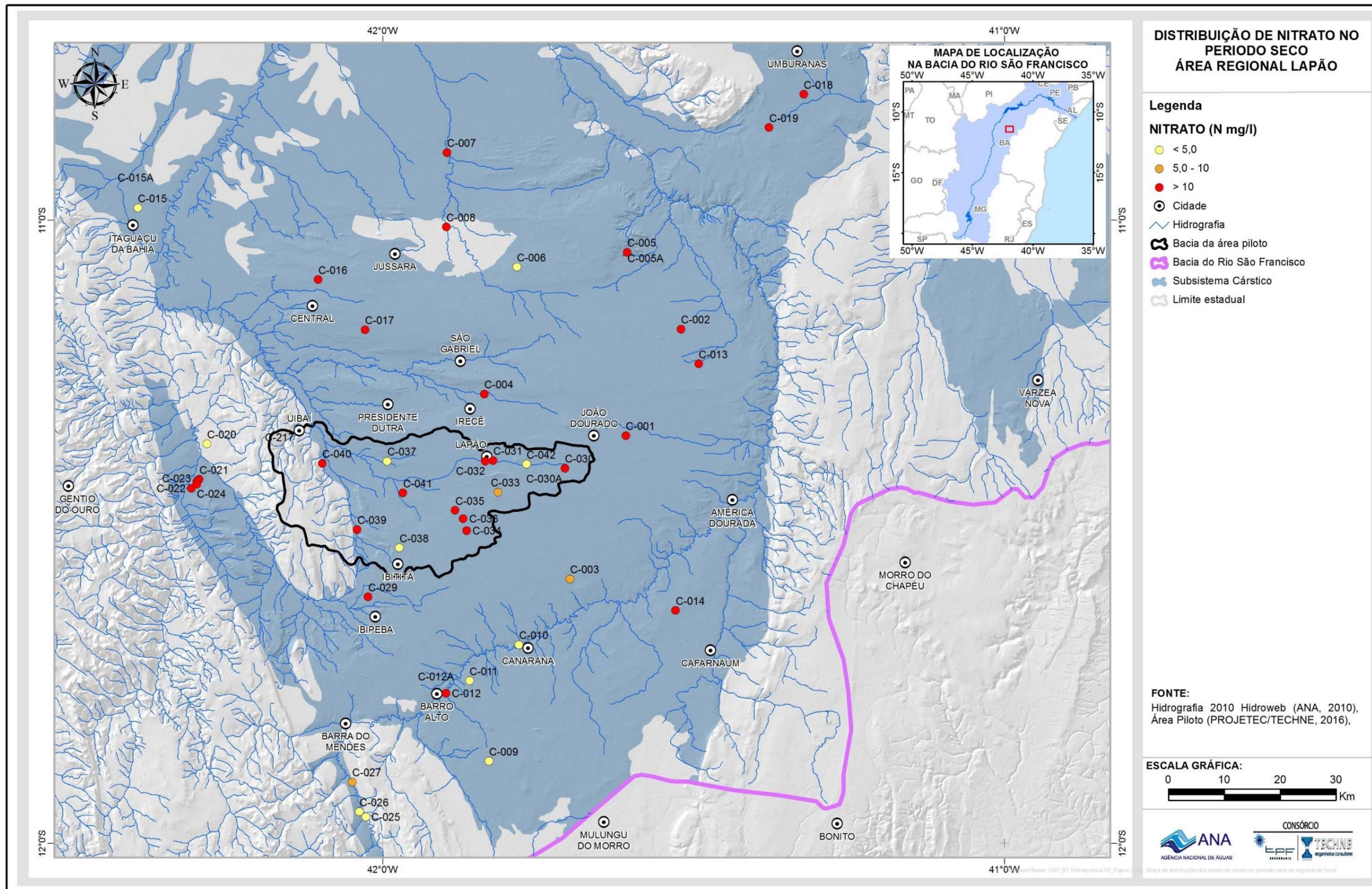


Figura 5.43 - Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período seco na regional de Irecê.

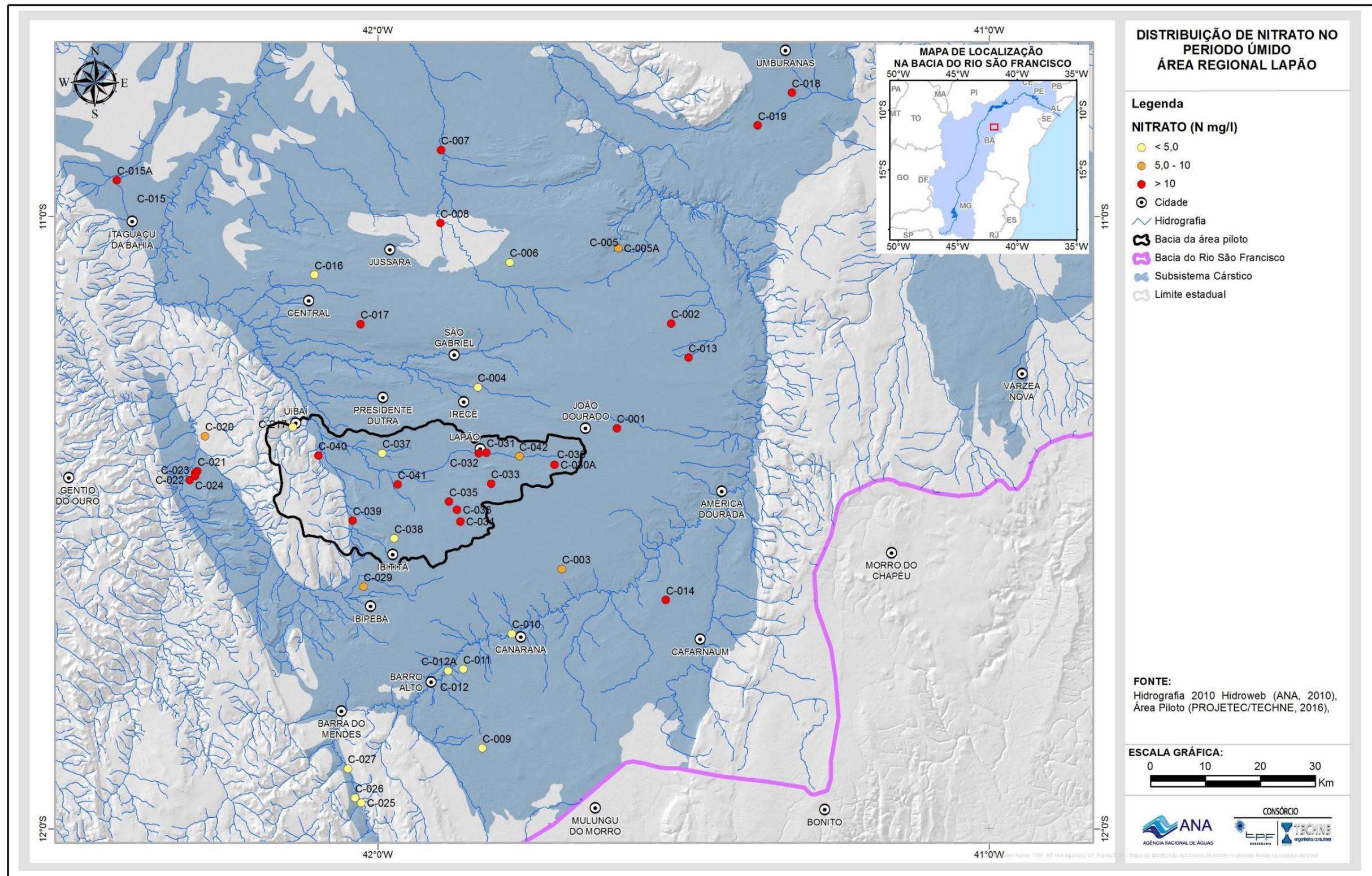


Figura 5.44 - Mapa de distribuição dos teores de nitrato no período úmido na regional de Irecê.

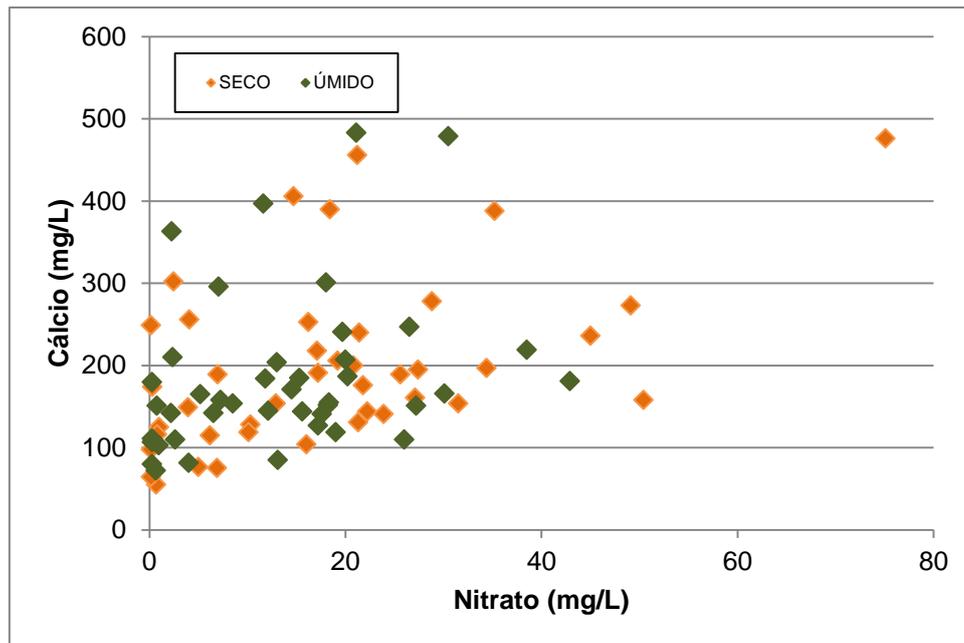


Figura 5.45 - Correlação entre nitrato e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

O ferro ocorre em teores maiores do que os de manganês nas águas subterrâneas na região de Irecê (Tabelas 5.1 e 5.2). Nota-se que poucos poços (C-008, C-012, C-025, C-026, C-027, C-042) apresentam concentrações consideráveis de ferro nas suas águas, inclusive os poços C-025 e C-026, posicionados na parte sul da área, no período úmido atingem teores de ferro em torno de 2,3 mg/L. Os maiores teores de ferro encontrados nessas águas podem estar relacionados a questões construtivas dos poços e de parte da bomba oxidada em contato com a água. Não fica descartada a origem litológica desses elementos, já que alguns minerais carbonáticos têm ferro na sua composição.

A presença de manganês nessas águas ocorreu na sua maioria como traços. Apenas quatro poços têm teores acima de 0,1 mg/L (C-008, C-010, C-12A, C-025, C-026). Destaca-se o poço C-012A, nas proximidades de Barro Alto, em que o teor de manganês chega até 2,85 mg/L no período úmido. Salienta-se ainda que, geralmente, os teores mais elevados de manganês estão acompanhados por potencial oxirredução negativo, conferindo um ambiente redutor, comum em ambiente calcário.

Nas águas estudadas são frequentemente observados, ainda, o constituinte secundário fluoreto em teores acima de 0,5 mg/L. A Tabela 5.15 e a Tabela 5.16 mostram o sumário estatístico do fluoreto para os dois períodos amostrais. No período seco os teores de fluoreto variaram de 0,03 (C-025, C-026) a 2,73 mg/L (C-006), com média de 0,47 mg/L. No úmido, os teores de fluoreto elevam-se, oscilando de 0,13 (C-021, C-026) a 2,78 mg/L (C-016), com média de 0,80 mg/L.

As Figura 5.46 e Figura 5.47 mostram a distribuição do fluoreto nos dois períodos de amostragem. Verifica-se que no período seco os poços com teores

acima de 1,0 mg/L, estão localizados na parte norte da área e na área piloto. Já no período úmido cresce o número de poços com teores acima de 1,0 mg/L, inclusive com resultados acima 2,0 mg/L, como são os casos dos poços C-006, C-016, C-017, C-037, estando posicionados parte sul e norte da área, além na área piloto. Os teores elevados de fluoreto nas águas desses poços podem estar relacionados à presença de fluorita, que ocorre de forma descontínua nos carbonatos dolomíticos na área (Misi,1979), cuja maior dissolução se dá no período chuvoso.

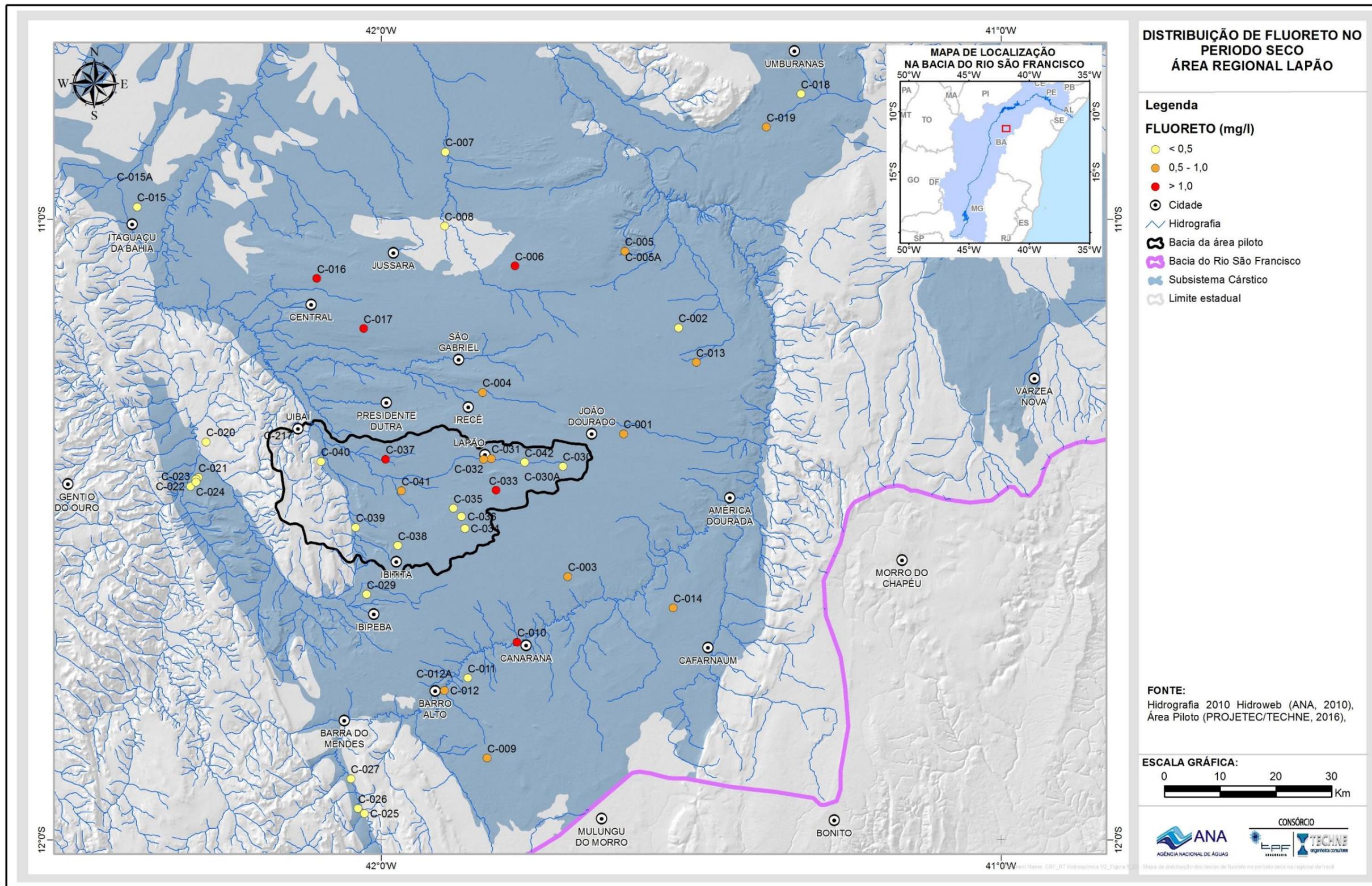


Figura 5.46 - Mapa de distribuição dos teores de fluoreto no período seco na regional de Irecê.

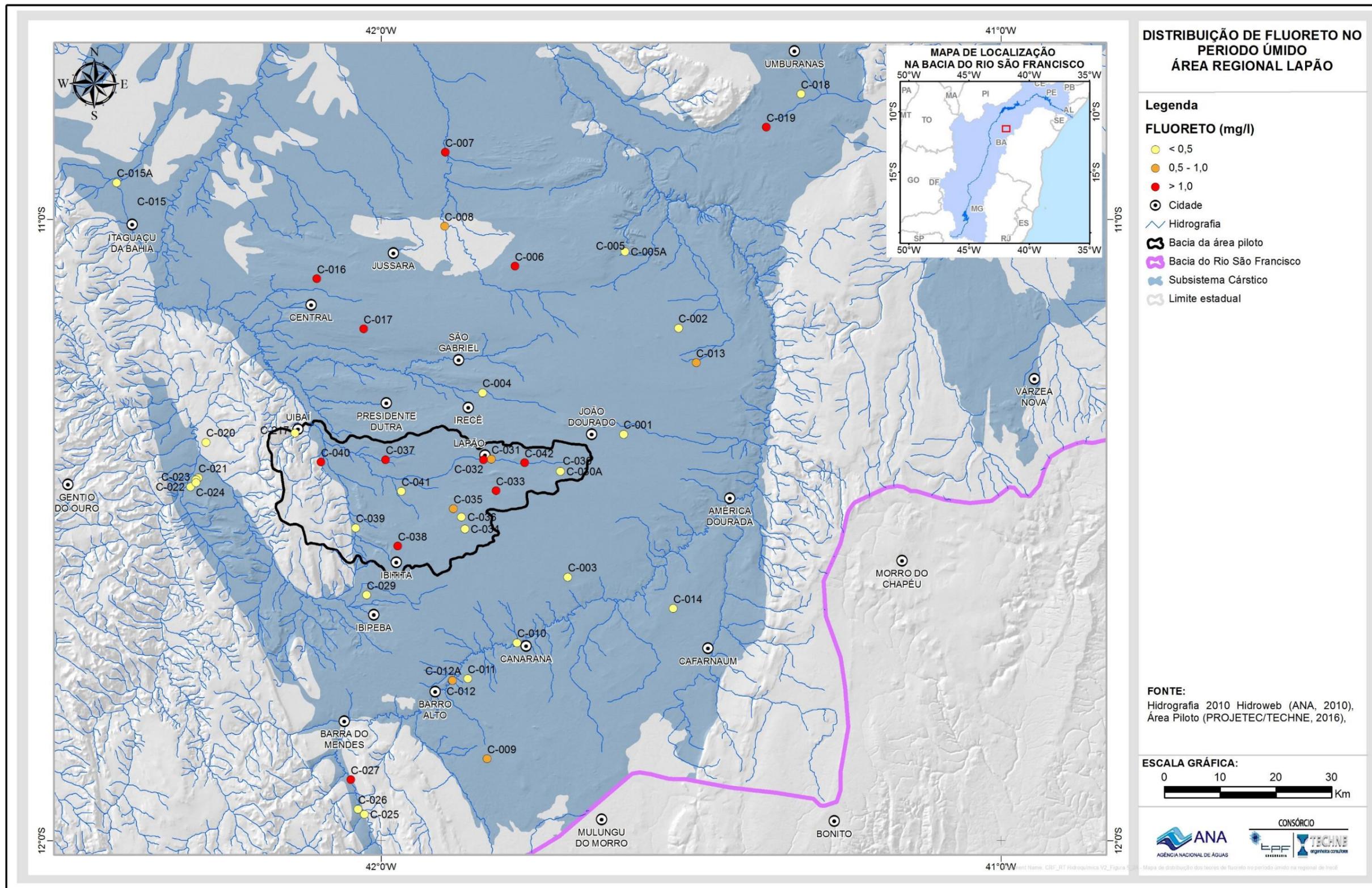


Figura 5.47 - Mapa de distribuição dos teores de fluoreto no período úmido na regional de Irecê.

Os resultados da dureza para as águas subterrâneas, na região de Irecê, estão apresentados na Tabela 5.15 e Tabela 5.16, 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 5.48 e Figura 5.49. 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, os teores maiores do que 600 mg/L estão predominantemente posicionados 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.

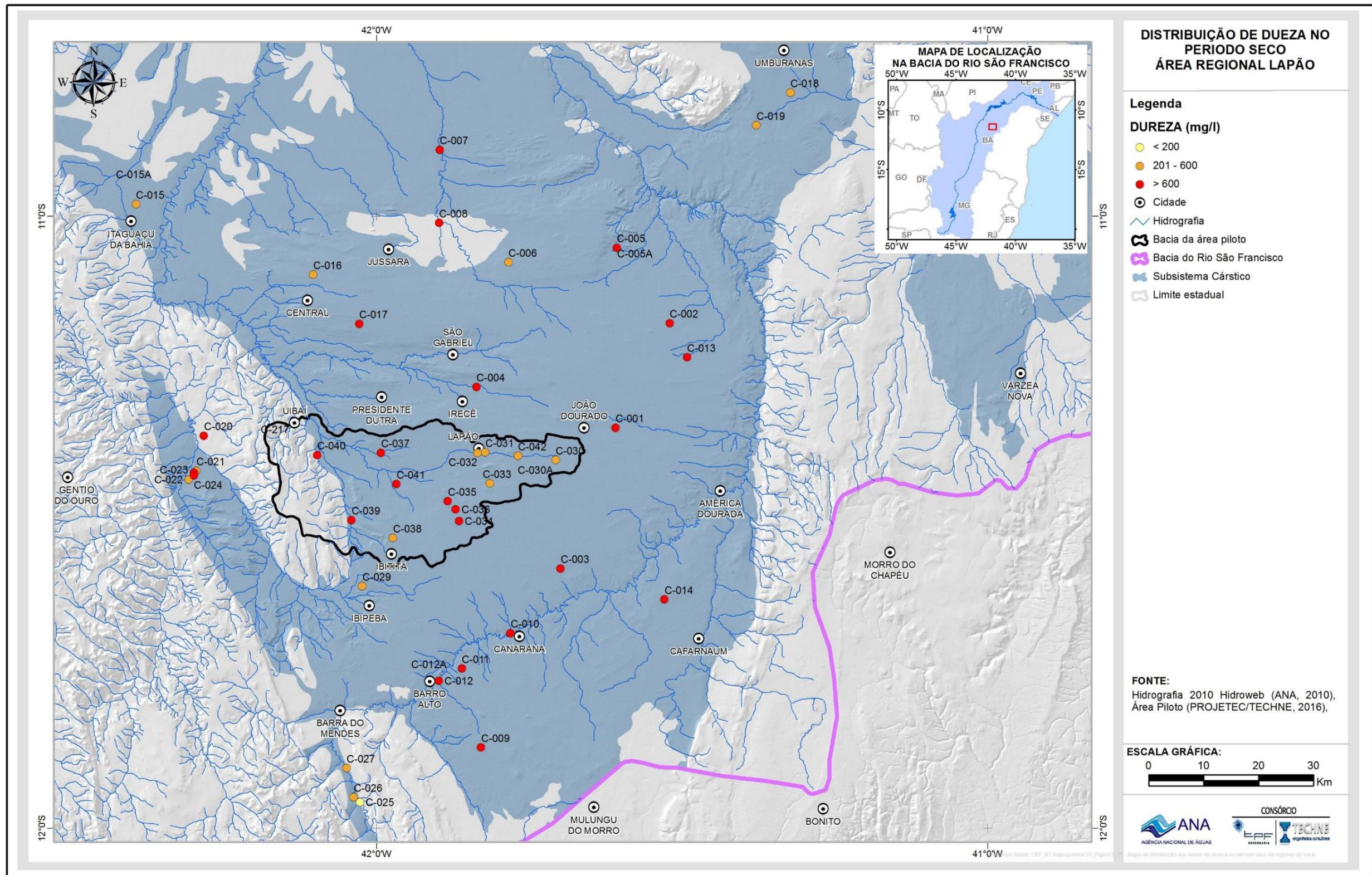


Figura 5.48 - Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê.

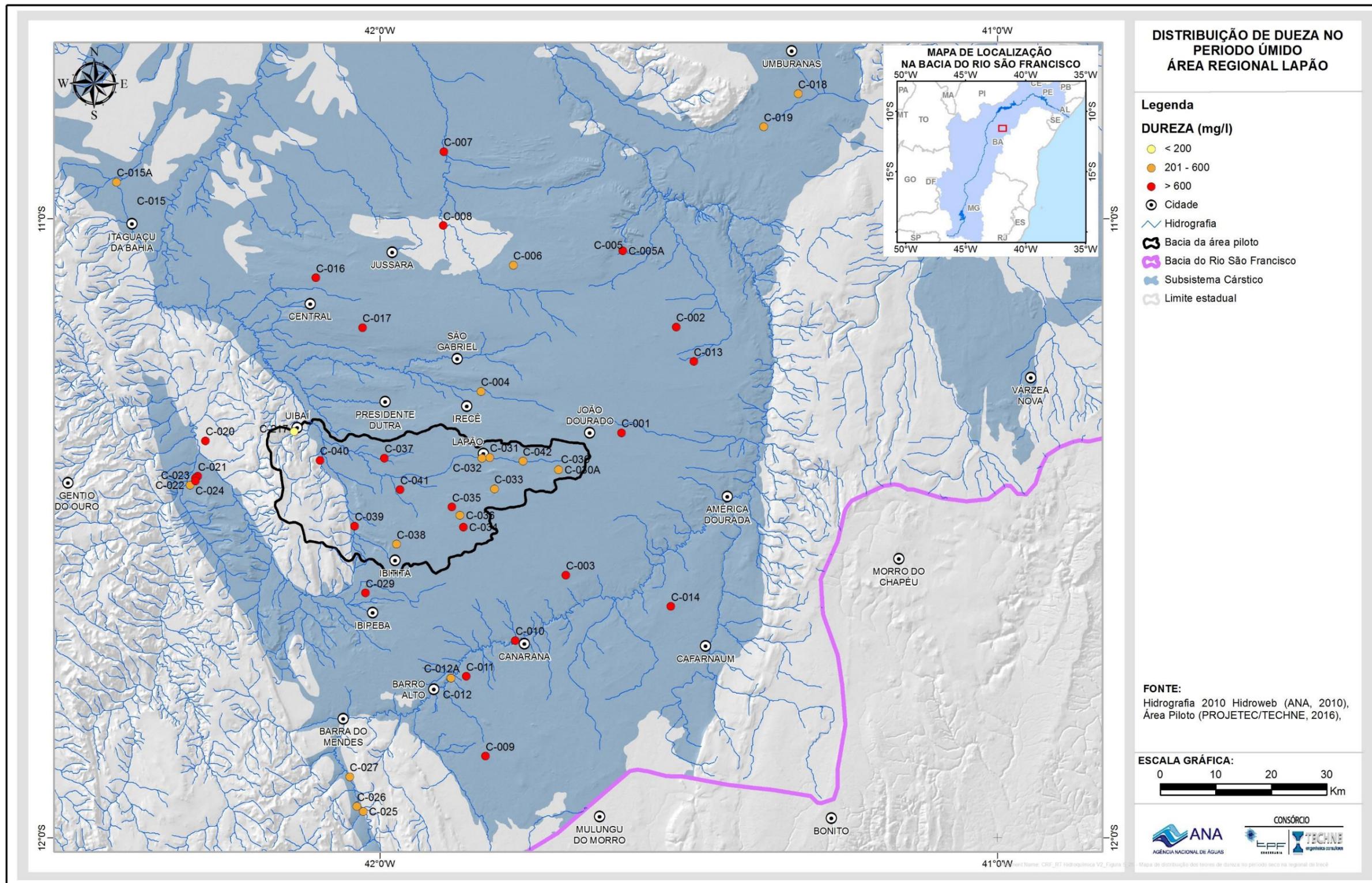


Figura 5.49 - Mapa de distribuição dos teores de dureza no período seco na regional de Irecê.

A dureza nas águas subterrâneas da área regional do Irecê parece ser controlada principalmente pelos parâmetros cálcio e magnésio. Recebendo ainda influência dos constituintes cloreto, sulfato e sódio, conforme demonstrado pelas representativas correlações nos gráficos nas Figura 5.50 a Figura 5.54.

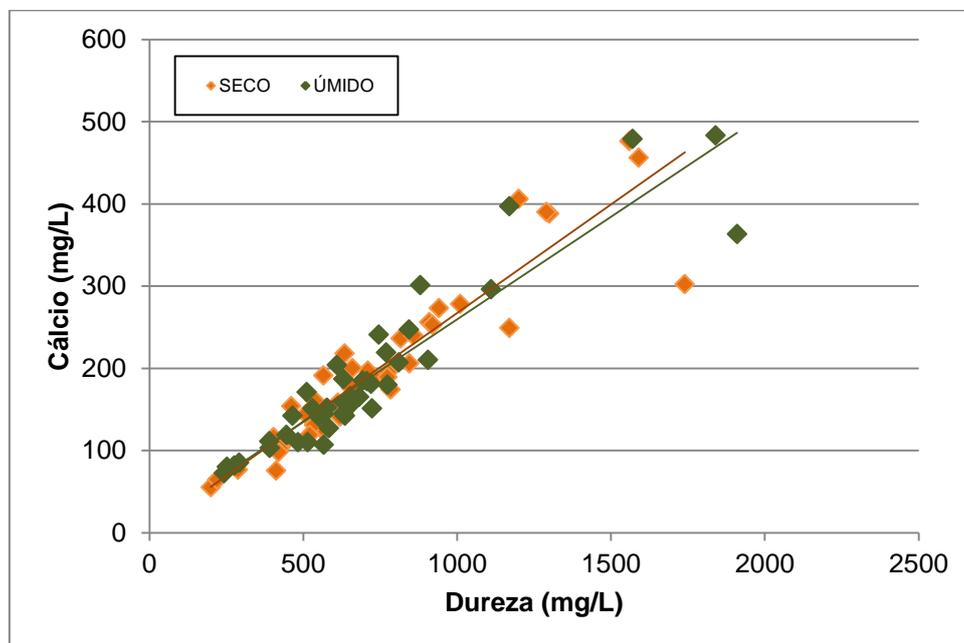


Figura 5.50 - Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

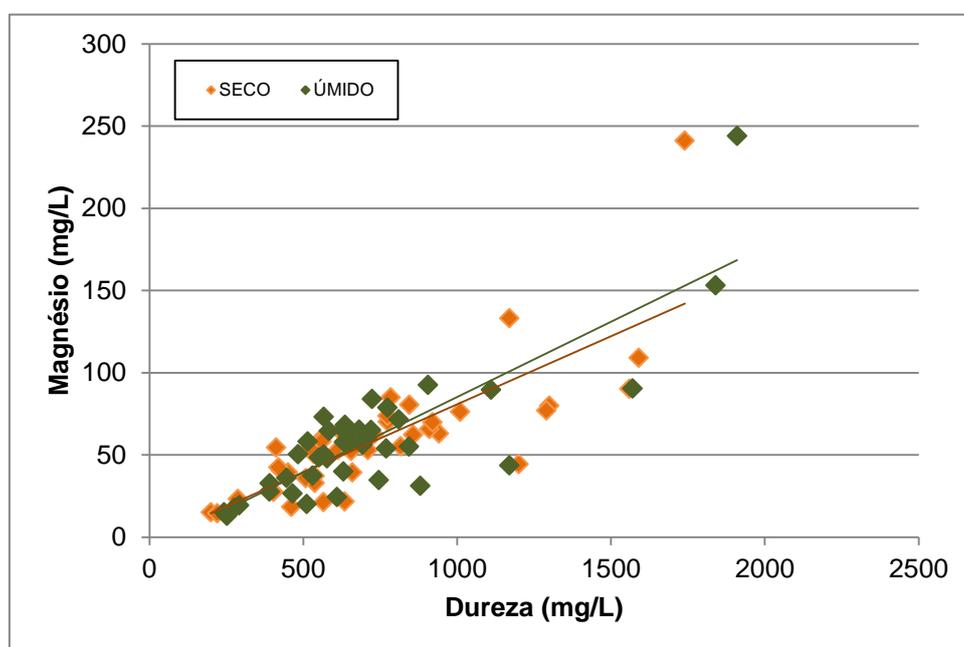


Figura 5.51 - Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

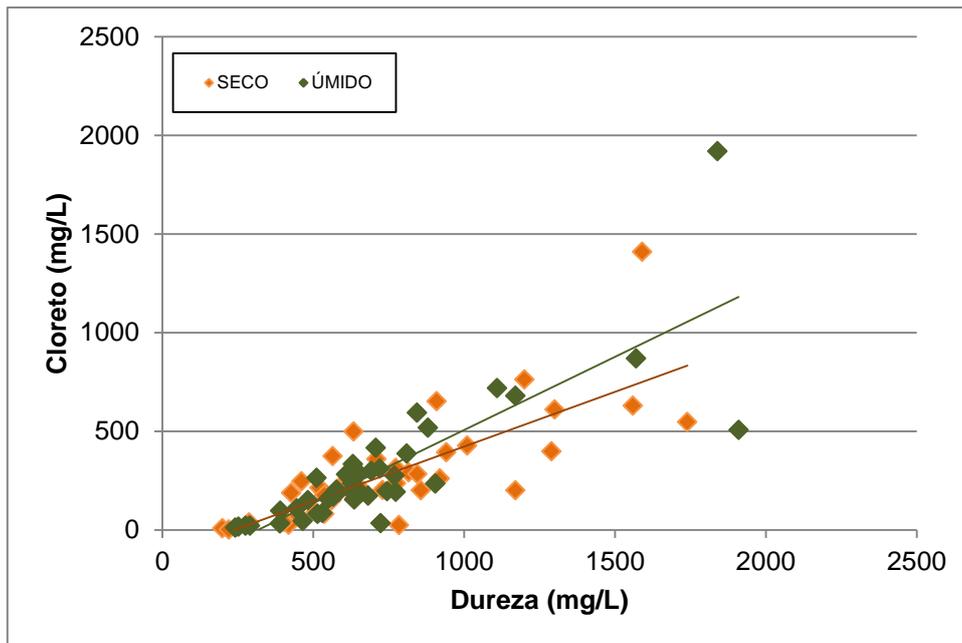


Figura 5.52 - Correlação entre dureza e cloreto em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

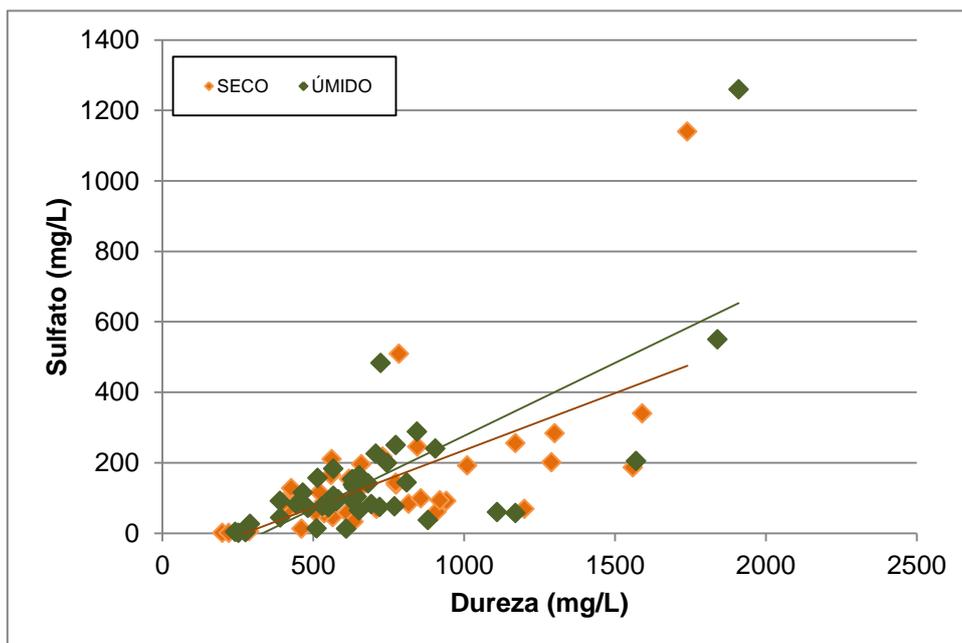


Figura 5.53 - Correlação entre dureza e sulfato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

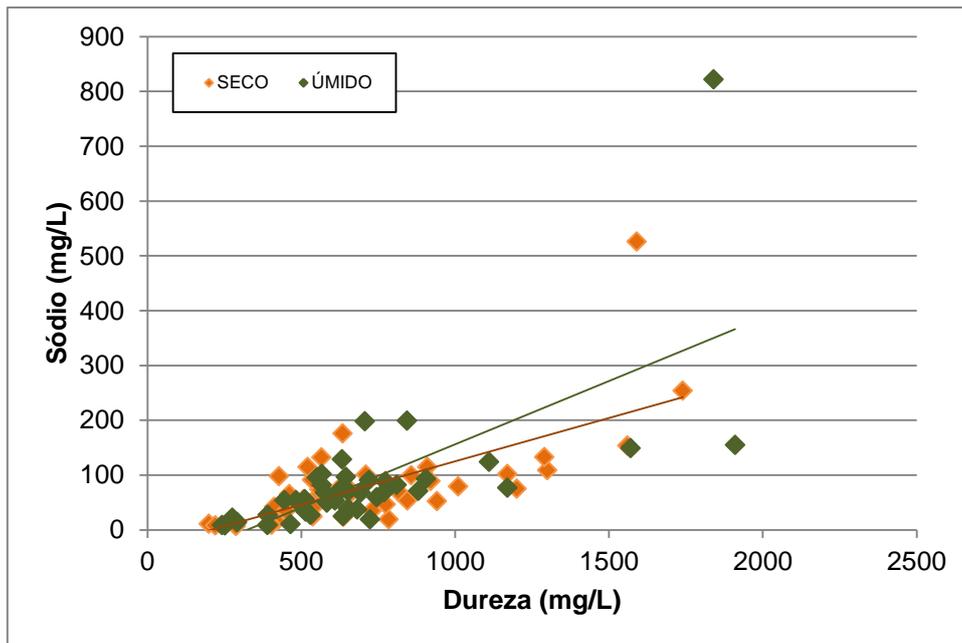


Figura 5.54 - Correlação entre dureza e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na regional de Irecê.

A Figura 5.50 mostra a correlação dos valores de cálcio e dureza, nos dois períodos de amostragem. Nota-se que os maiores valores da dureza estão relacionados aos teores elevados do cálcio, sugerindo, portanto, que a dureza é controlada, principalmente, pela presença de teores elevados de cálcio, íon dominante na composição litológica dos calcários da Formação Salitre e das suas unidades, na região de Irecê. Nesse gráfico de dispersão é possível evidenciar também que a maioria das amostras está alinhada em torno das linhas de tendência, indicando assim correlações positivas fortes.

O magnésio também mostra uma correlação positiva, moderada a forte, para os dois períodos sazonais. Existe uma concentração de amostras no campo de valores relativamente mais baixos para as duas variáveis, mas existe um desenho claro de um alinhamento geral de pontos (Figura 5.51).

Os gráficos de dispersão dureza com o cloreto (Figura 5.52) e com o sódio (Figura 5.54) apresentam comportamentos similares em ambos os períodos de amostragem, exibindo tendências de correlações positivas entre as variáveis, mais nítidas no caso do cloreto.

No gráfico da dureza com o sulfato (Figura 5.53) observa-se uma tendência de discreta correlação positiva, mesmo existindo uma concentração de valores nos campos de valores relativamente baixos para as duas variáveis. É interessante registrar a presença de quatro amostras afastadas dos alinhamentos gerais dos pontos e que indicam um relativo enriquecimento de sulfato em relação à dureza, possivelmente, relacionado à presença de sulfetos metálicos, principalmente pirita, disseminados nos calcários (Guerra, 1986).

Assim, a dureza mostra correlações positivas moderadas com cloreto, sódio, sulfato e fortes com cálcio e magnésio. Portanto, a elevação da dureza dessas águas é função principalmente dos teores de cálcio e magnésio, muito frequente na litologia calcária da Formação Salitre, dominante em toda a área de Irecê. Outros elementos como cloreto, sulfato e sódio, também, contribuem para a elevação da dureza de forma mais subordinada.

A Tabela 5.18 mostra a classificação da dureza segundo Custódio & Llamas (1983). De acordo com essa classificação as águas muito duras são dominantes na área, nos dois períodos de amostragem. Exceto a água do poço C-217, localizado no quartzito Formação Morro do Chapéu, que tem água dura.

Tabela 5.18 - Classificação das águas segundo a dureza em mg/L (CaCO₃) (Custódio & Llamas, 1983).

| Tipo | Teor de CaCO ₃ (mg/L) |
|-------------------|----------------------------------|
| Branda | < 50 |
| Pouco Dura | 50 – 100 |
| Dura | 100 – 200 |
| Muito Dura | > 200 |

5.2 Fácies hidroquímicas

Na Figura 5.55 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. Em relação ao conteúdo iônico, a última fácies hidroquímica citada apresenta as águas com menor salinidade (< 1000 mg/L) do conjunto avaliado, conforme pode ser visualizado espacialmente na análise das figuras de distribuição dos STD (Figura 5.25 e Figura 5.26).

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.

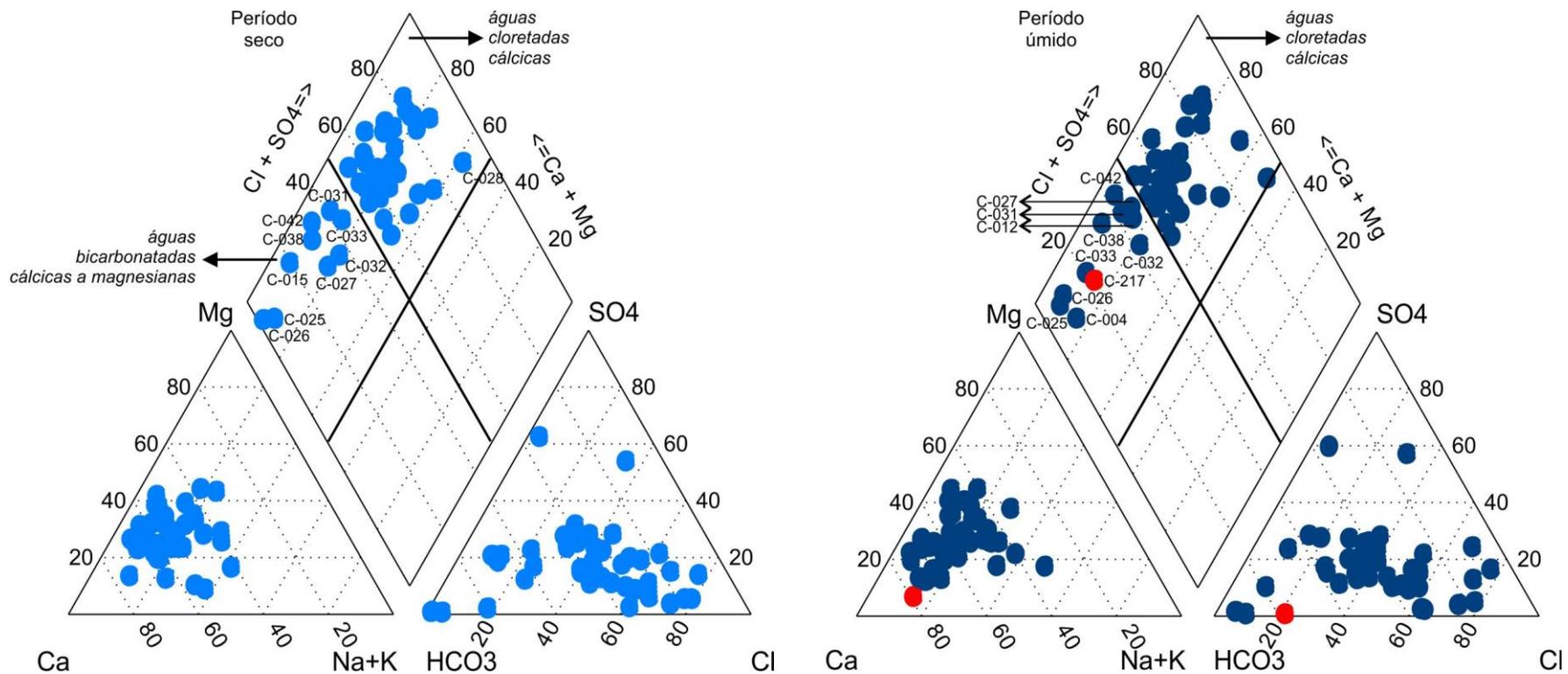


Figura 5.55 - Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Irecê. A amostra vermelha corresponde a coleta na Formação Morro do Chapéu.

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 5.25 e Figura 5.26). 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.

5.3 Parâmetros Específicos

5.3.1 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 Irecê foram realizadas 7 coletas para metais pesados, cuja localização encontra-se na Figura 4.1 e os resultados analíticos apresentados na Tabela 5.19.

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

| | 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-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.

5.3.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 30 amostras na área regional de Irecê, cuja localização encontra-se na Figura 4.1.

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 capítulo 2 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.

5.3.3 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 (Tabela 5.20) cuja localização encontra-se na Figura 4.1. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 5.20 – 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 n° 2914/2011

5.4 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.

Os guias atuais para determinar a potabilidade das águas baseiam-se em dois critérios distintos:

- Risco a saúde: diz respeito aos efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos da água. Representam uma série de constituintes químicos (que são fixados por concentrações máximas permitidas) e bacteriológicos.
- Aspectos organolépticos (ou estéticos): conjunto de parâmetros caracterizados por provocar estímulos sensoriais que afetam a aceitação para consumo humano, mas que não necessariamente implicam risco à saúde.

No Brasil, a Portaria n° 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 5.21 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 5.22 (substâncias organolépticas).

Tabela 5.21 - 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 5.22 - 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. Os referidos parâmetros e os teores obtidos são apresentados nas Figura 5.56 a Figura 5.64 e a Tabela 5.23 sumariza o quantitativo de amostras impróprias para o consumo humano para cada parâmetro supracitado.

Tabela 5.3 - 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%) | 4 amostras (9%) |

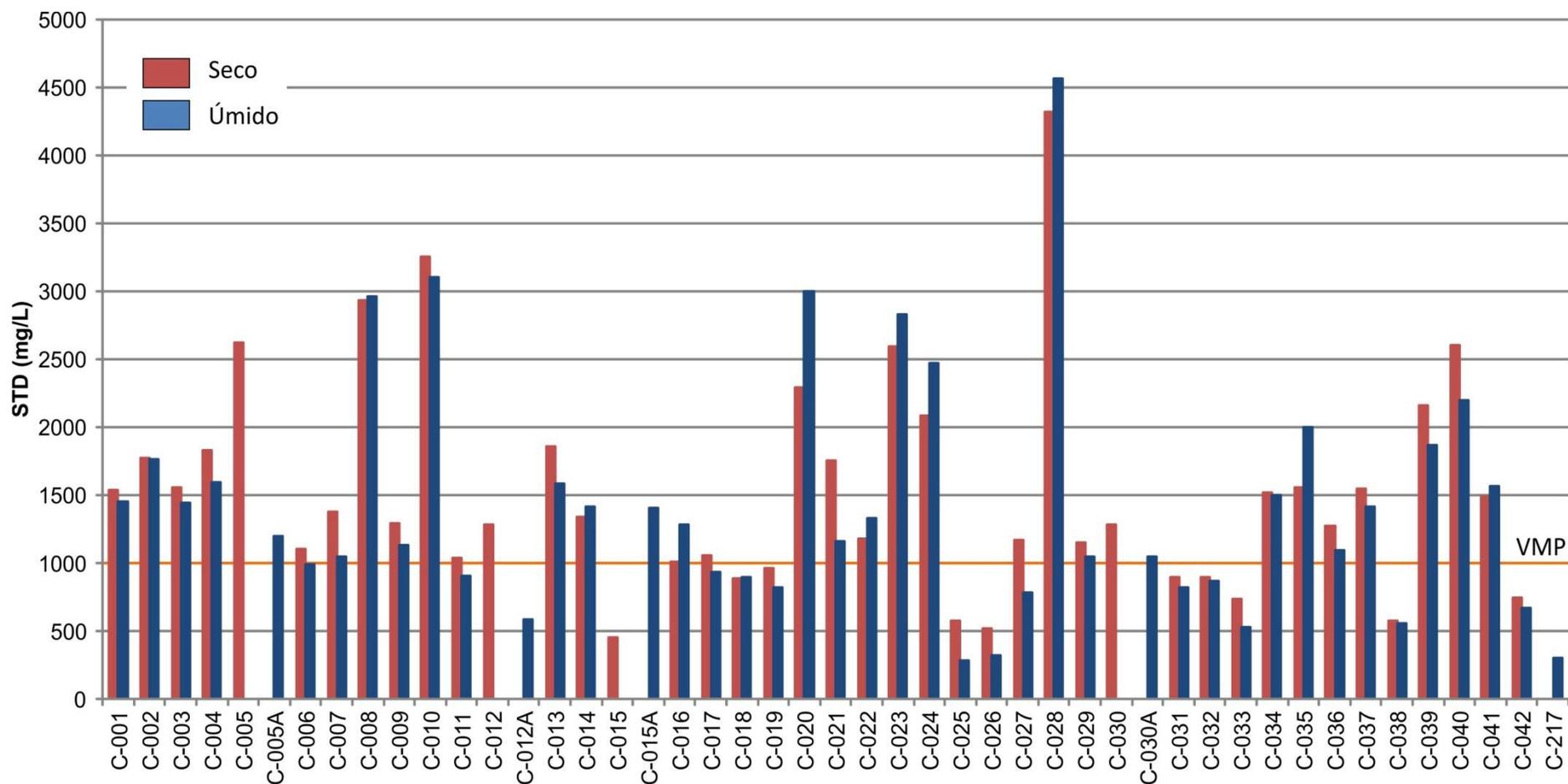


Figura 5.56 - Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

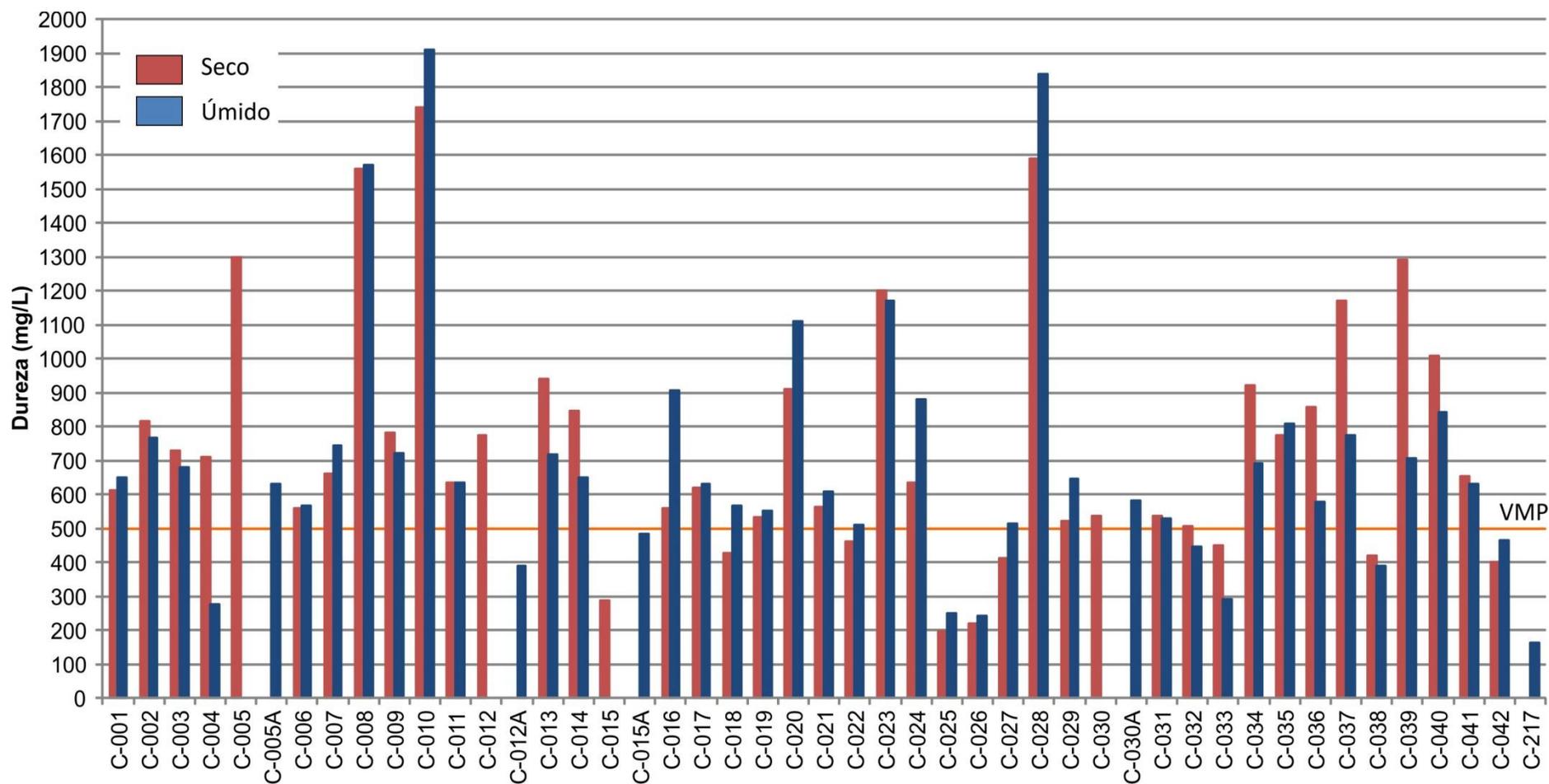


Figura 5.57 - Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

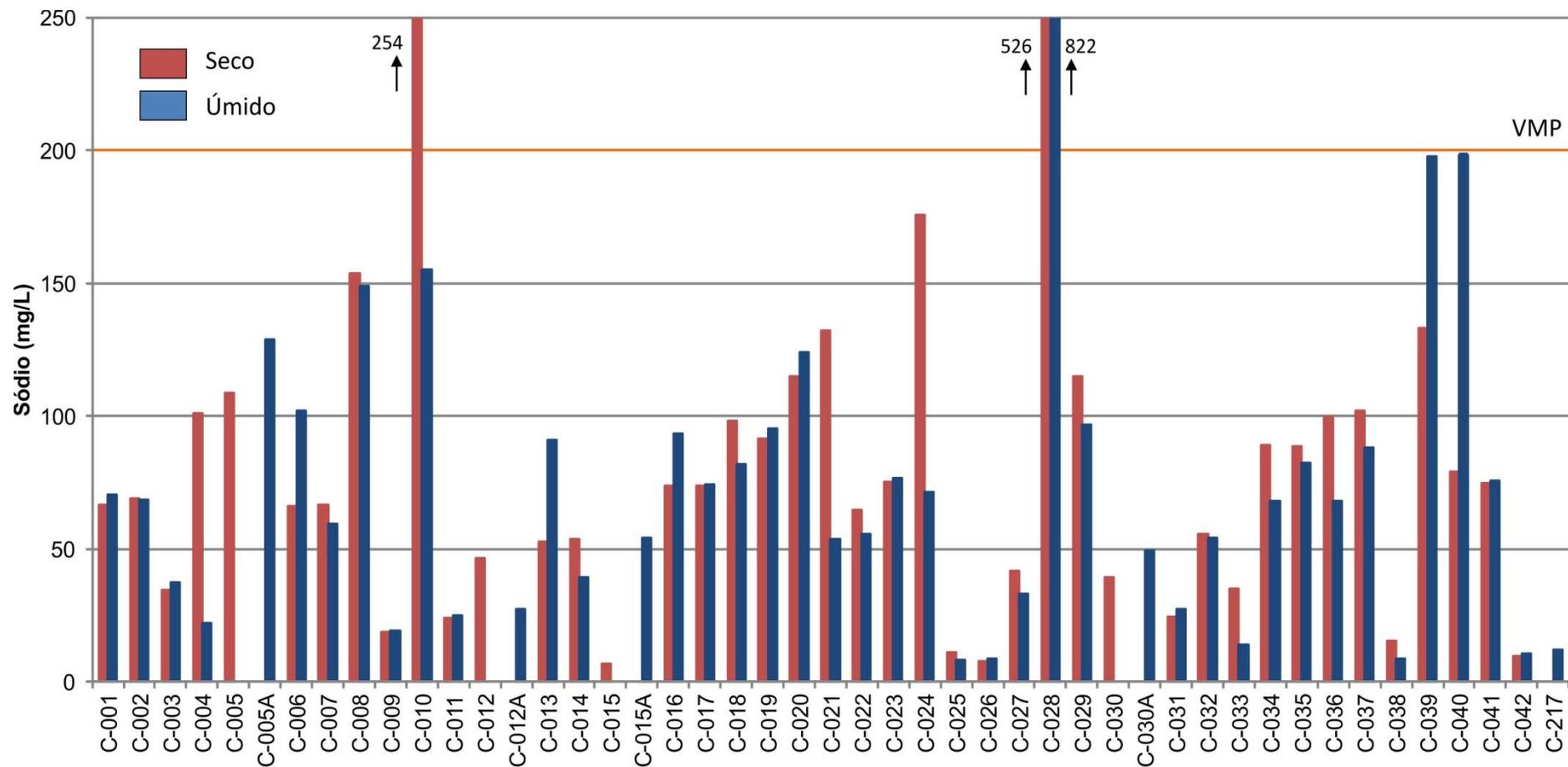


Figura 5.58 - Resultados analíticos para o parâmetro sódio e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

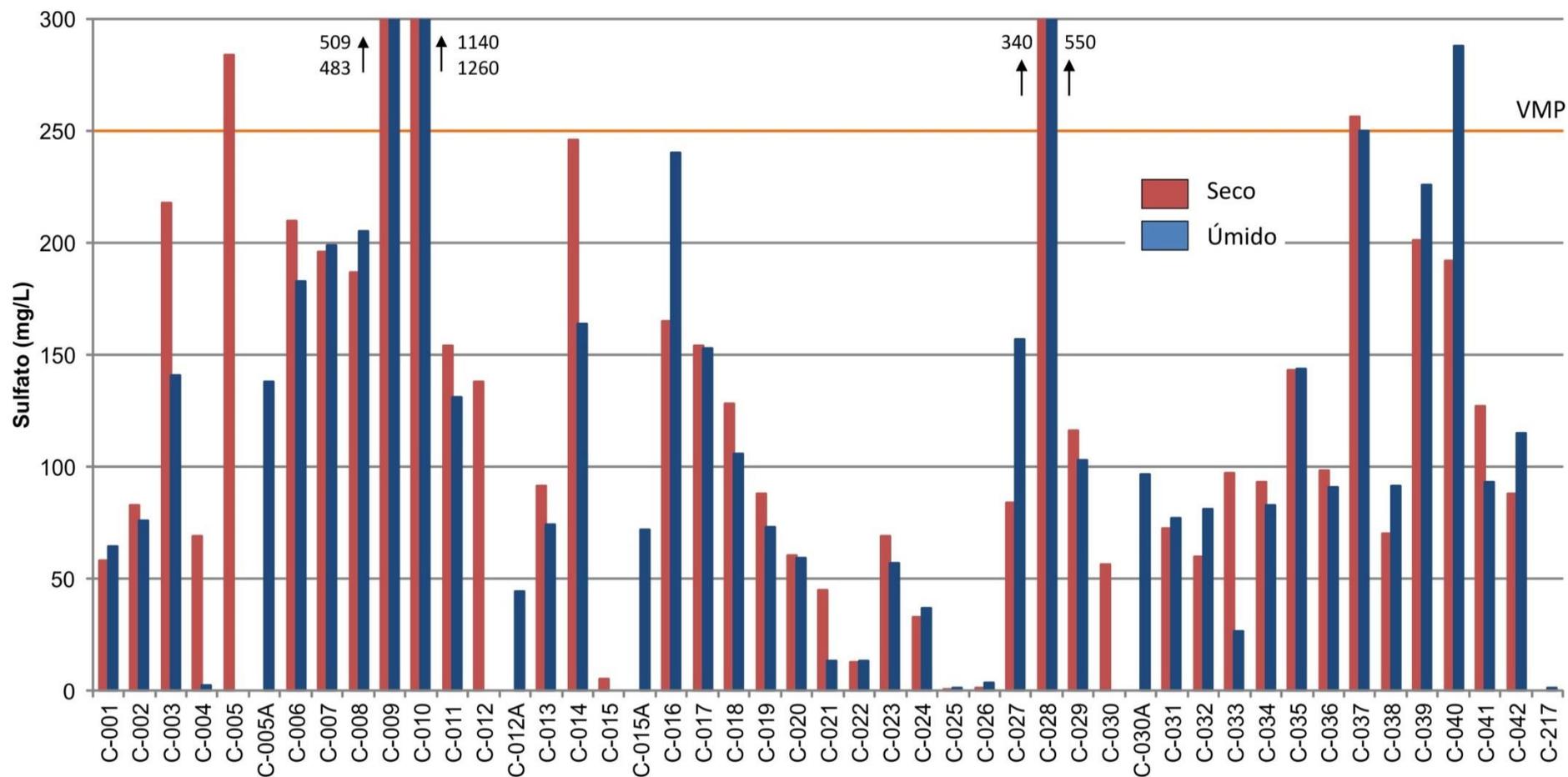


Figura 5.59 - Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

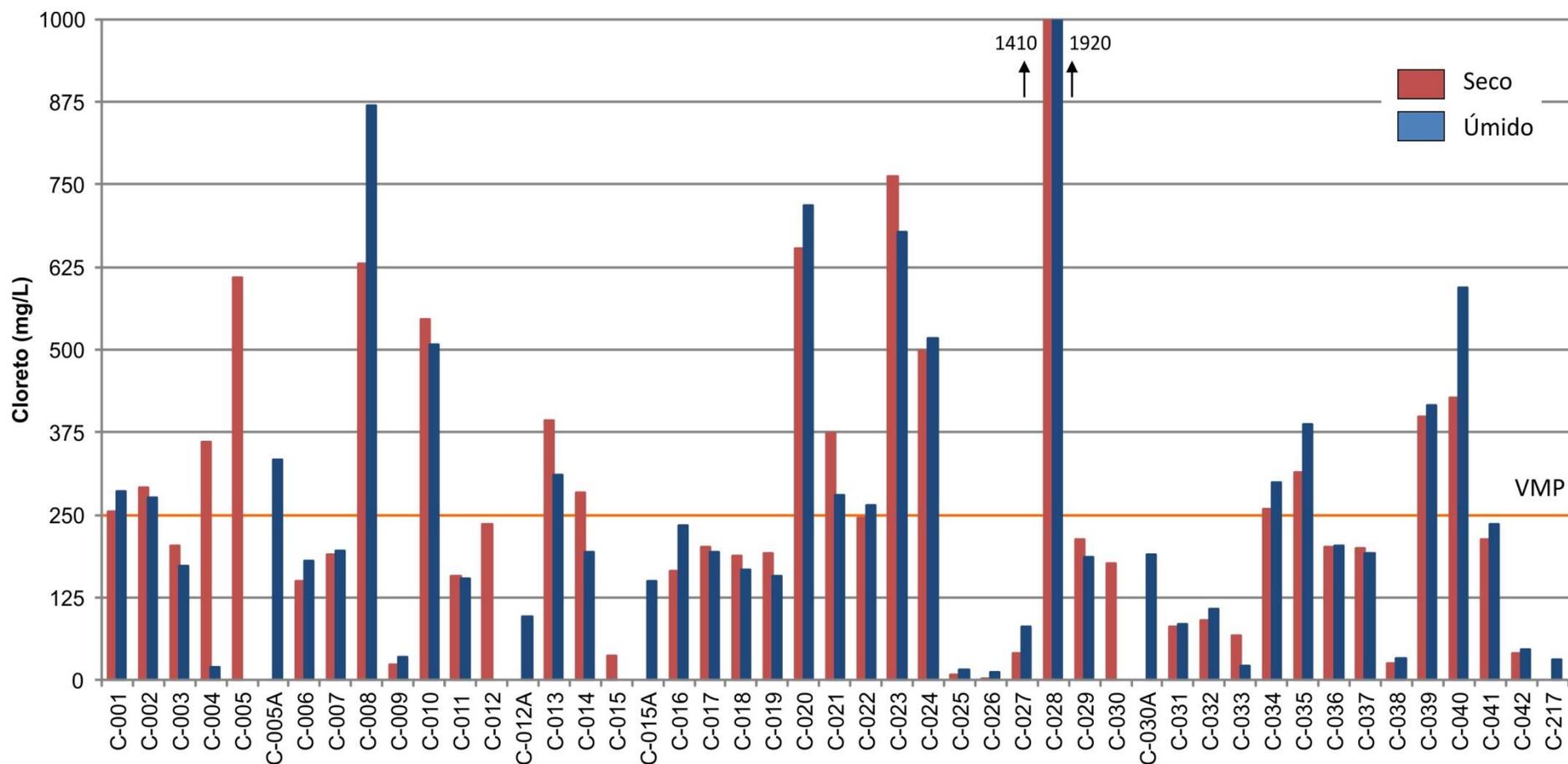


Figura 5.60 - Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

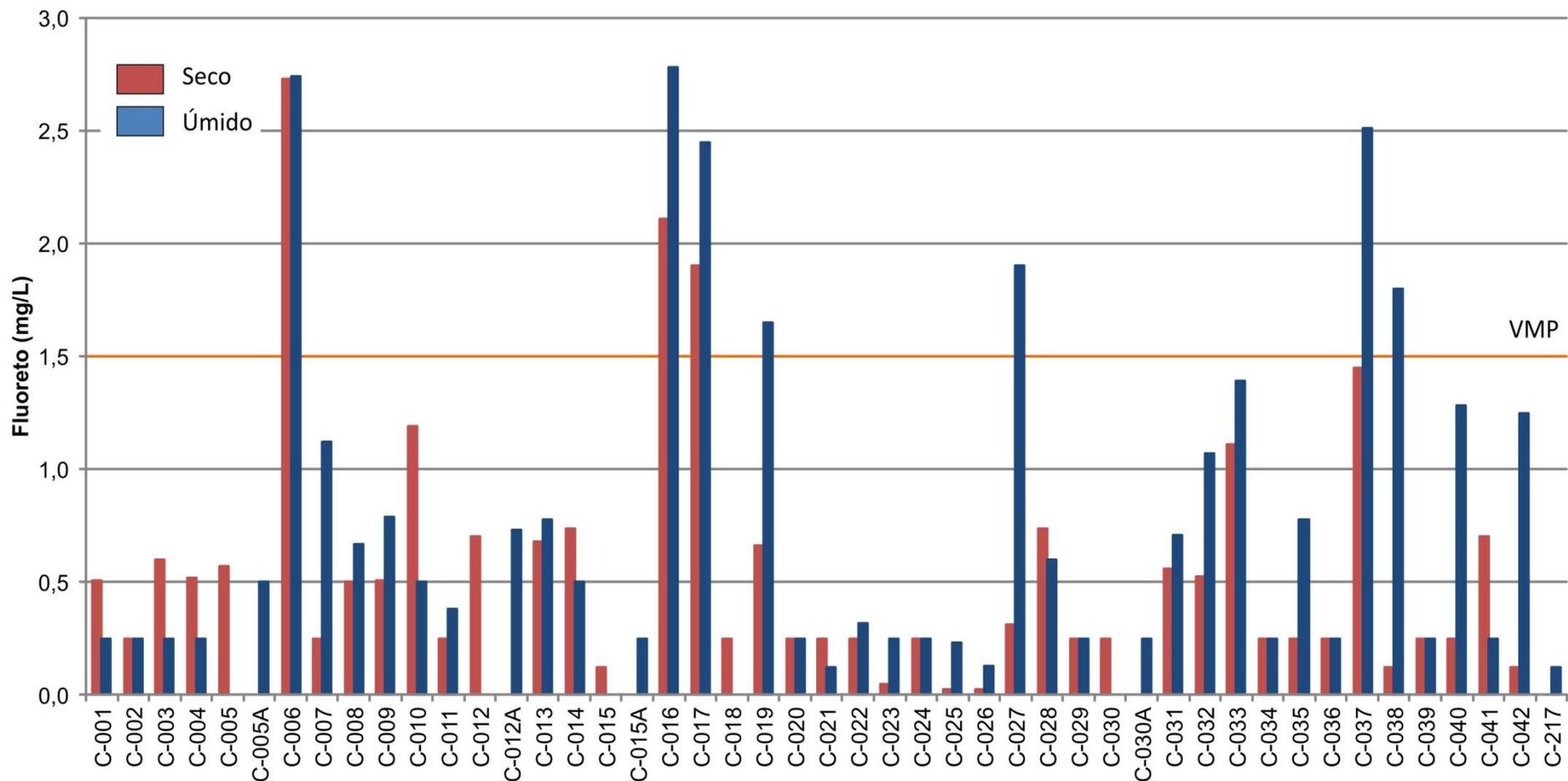


Figura 5.61 - Resultados analíticos para o parâmetro fluoreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP

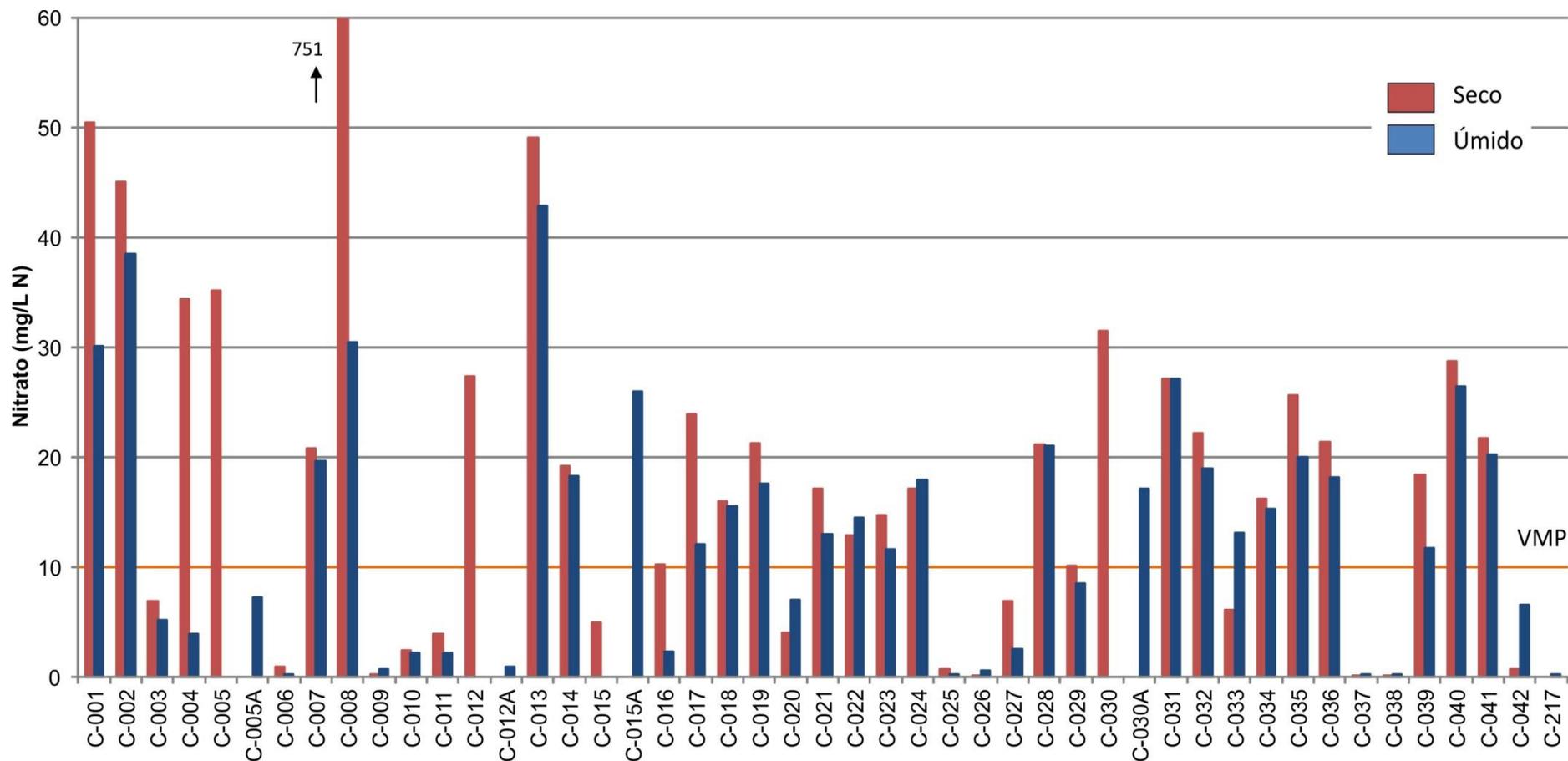


Figura 5.62 - Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP

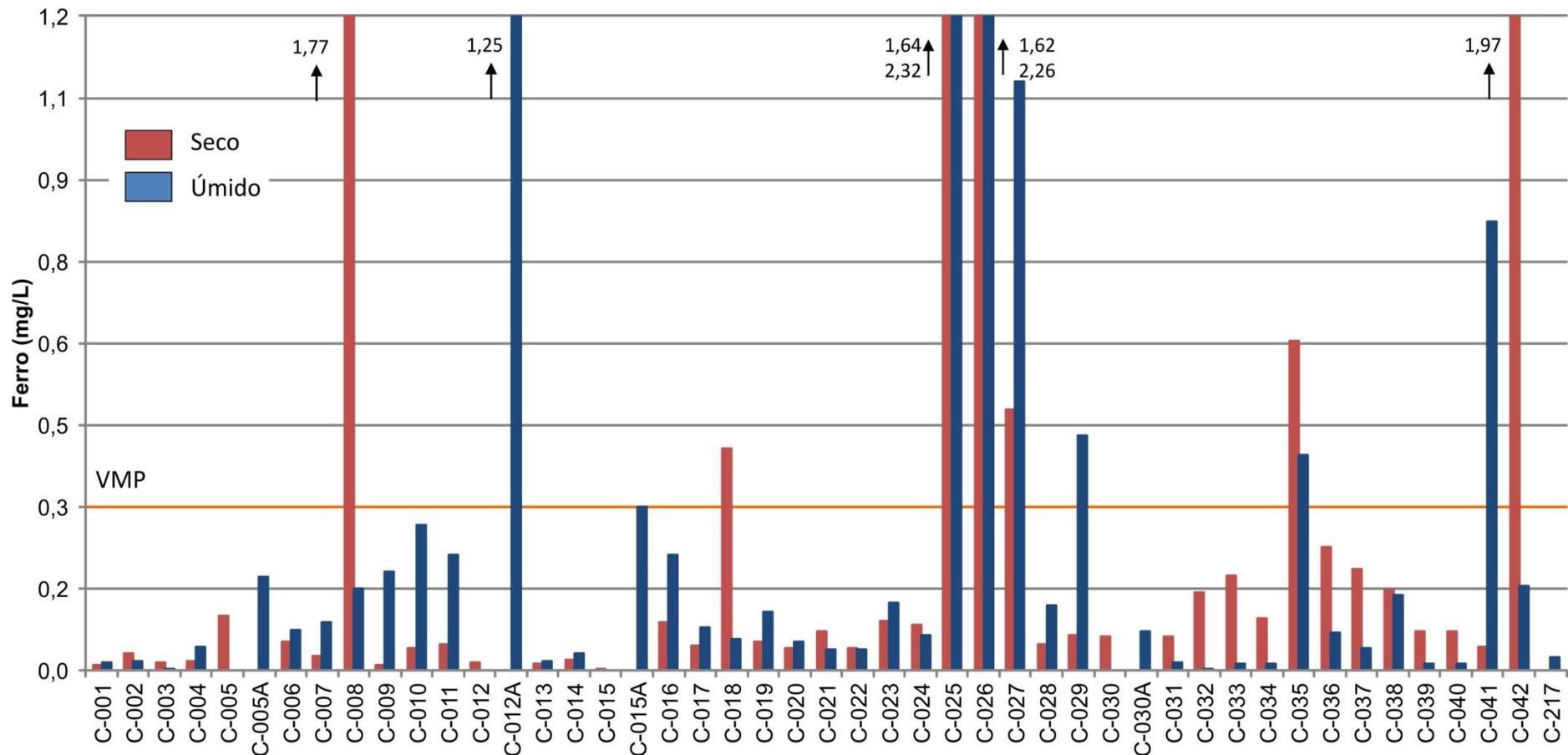


Figura 5.63 - Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

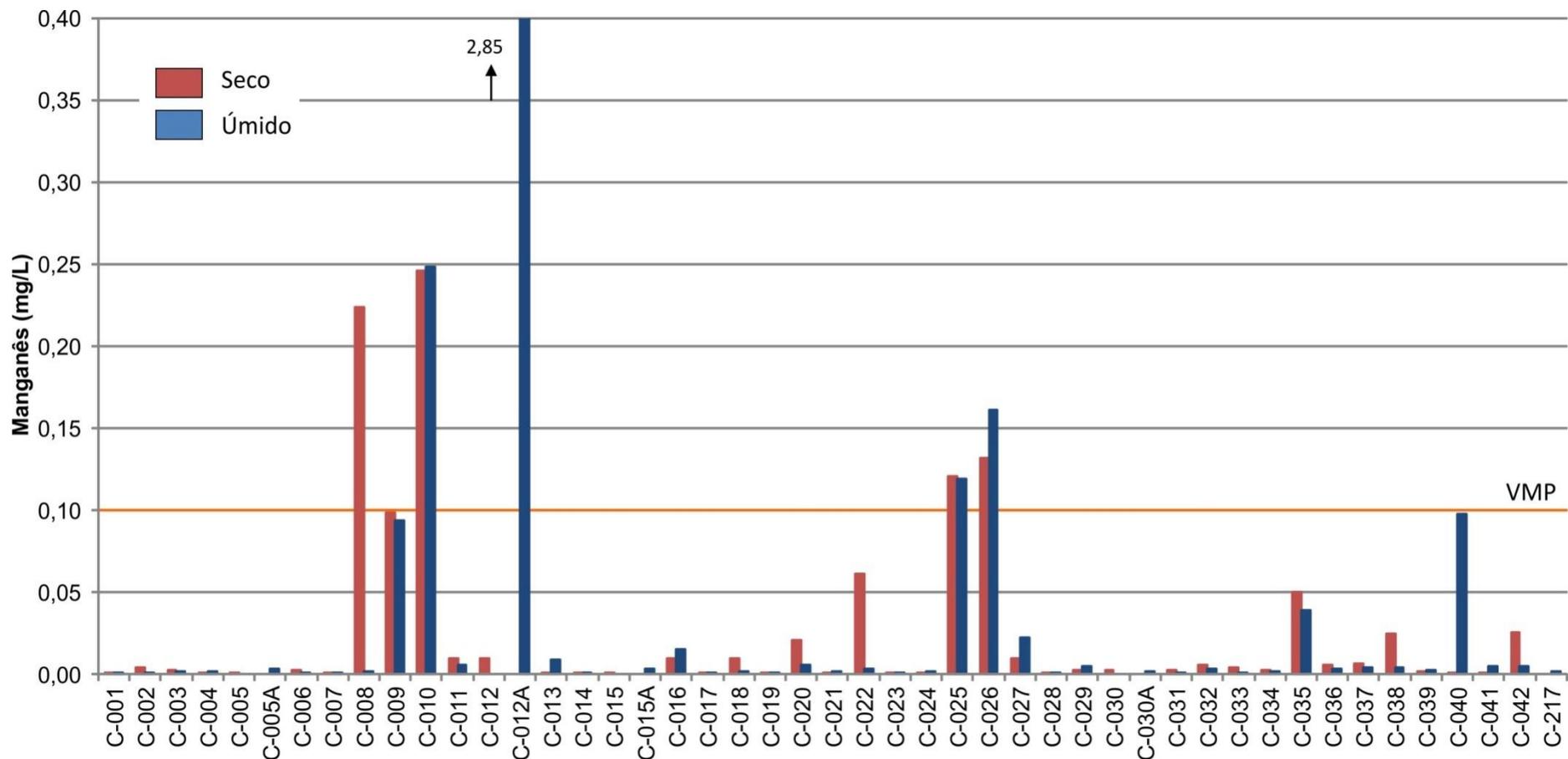


Figura 5.64 - Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

5.5 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 5.24.

Tabela 5.24 – 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 |

5.5.1 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 5.65, 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.

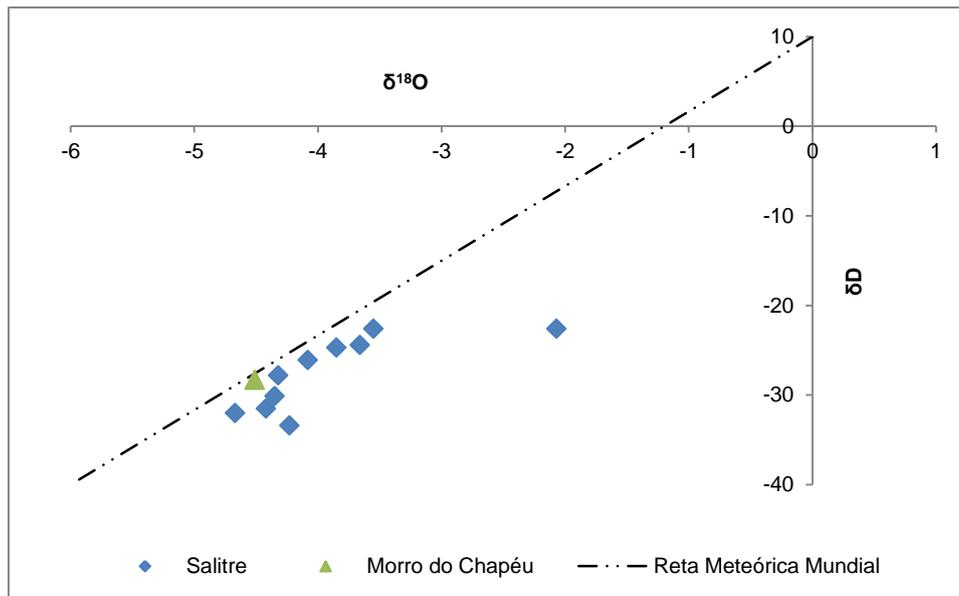


Figura 5.65 - Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD das amostras.

5.5.2 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 *et al.*, 2004). Já nas águas subterrâneas, a variação isotópica de estrôncio é semelhante à 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 de 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 minerais 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 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 estudos foram realizadas análises de isótopos de estrôncio na segunda campanha de amostragem (período úmido), nos pontos indicados na Tabela 5.24 e visualizados na **Figura 4.**

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.

5.6 Considerações Finais

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. Especialmente, 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 Cenozoicas. Esse comportamento indica, assim, que nesses últimos pode estar ocorrendo mistura de águas.

6. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 2 - São Desidério

Na avaliação hidrogeoquímica das águas subterrâneas para a área Regional de São Desidério foi possível agrupar as amostras 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.

Na interpretação hidrogeoquímica serão considerados, ainda, 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 6.1 apresenta a localização das amostras supracitadas.

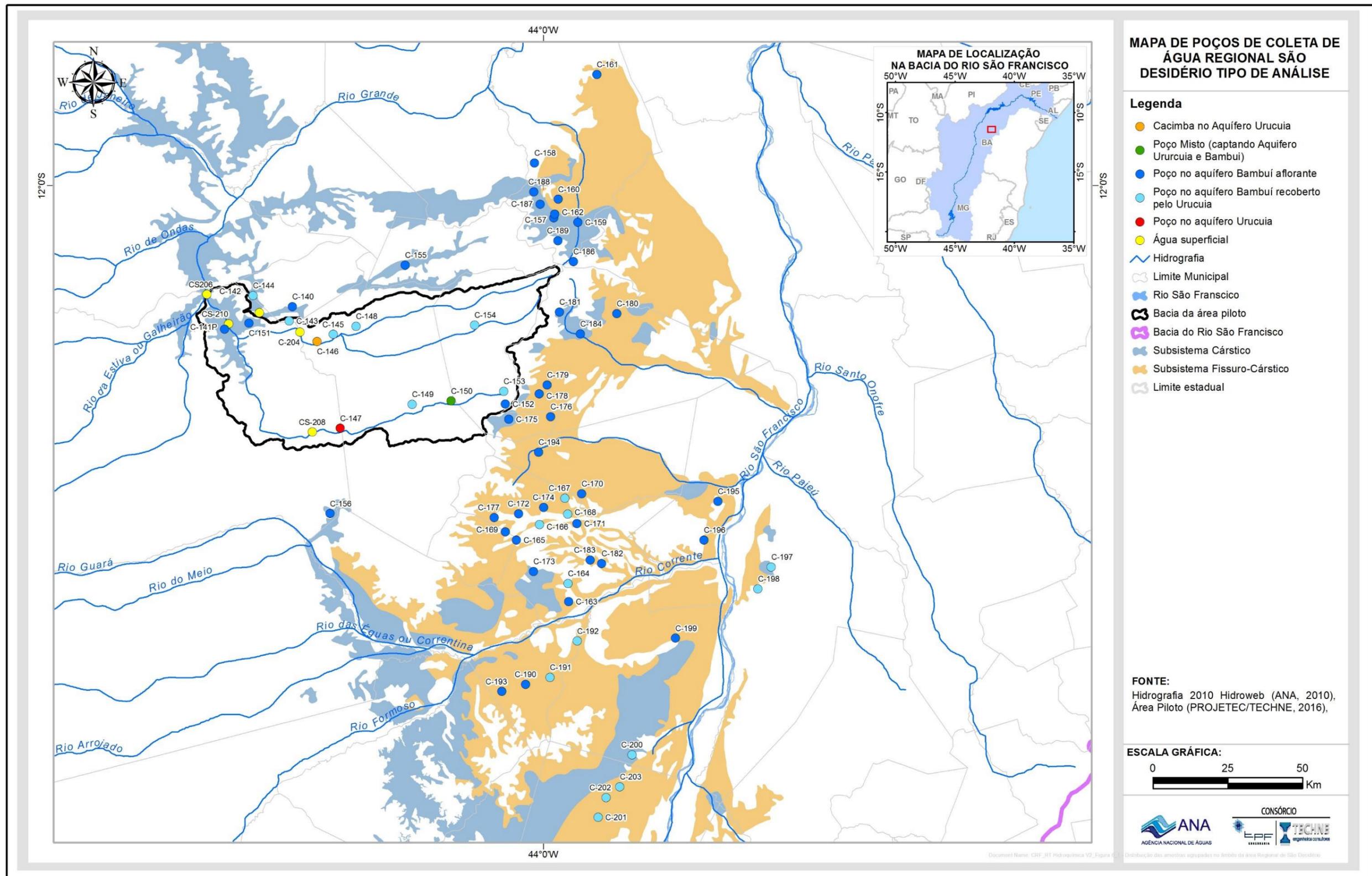


Figura 6.1 - Distribuição das amostras agrupadas no âmbito da área Regional de São Desidério.

6.1 Estatística Descritiva

As características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas da área regional de São Desidério possuem variações condicionadas por diversos aspectos, como fatores geológicos/hidrogeológicos e da sazonalidade climática da região. Tais fatores serão avaliados sob o ponto de vista da hidroquímica, num primeiro momento, mediante a análise dos dados estatísticos obtidos para cada grupo individualizado (Bambuí aflorante e Bambuí com cobertura) e por período amostral (seco e úmido), A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam um sumário estatístico de cada grupo para ambos os períodos de amostragem.

Tabela 6.1 - 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 |
| 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 6.2 – 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 |
| 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 NH3) | 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

6.1.1 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. 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) (Tabela 6.27). 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 6.3). Registra-se, que os valores maiores de STD estão notadamente posicionados na faixa leste da área (triângulos vermelhos na Figura 6.2). 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 6.3 a Figura 6.6).

Tabela 6.3 - 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 |

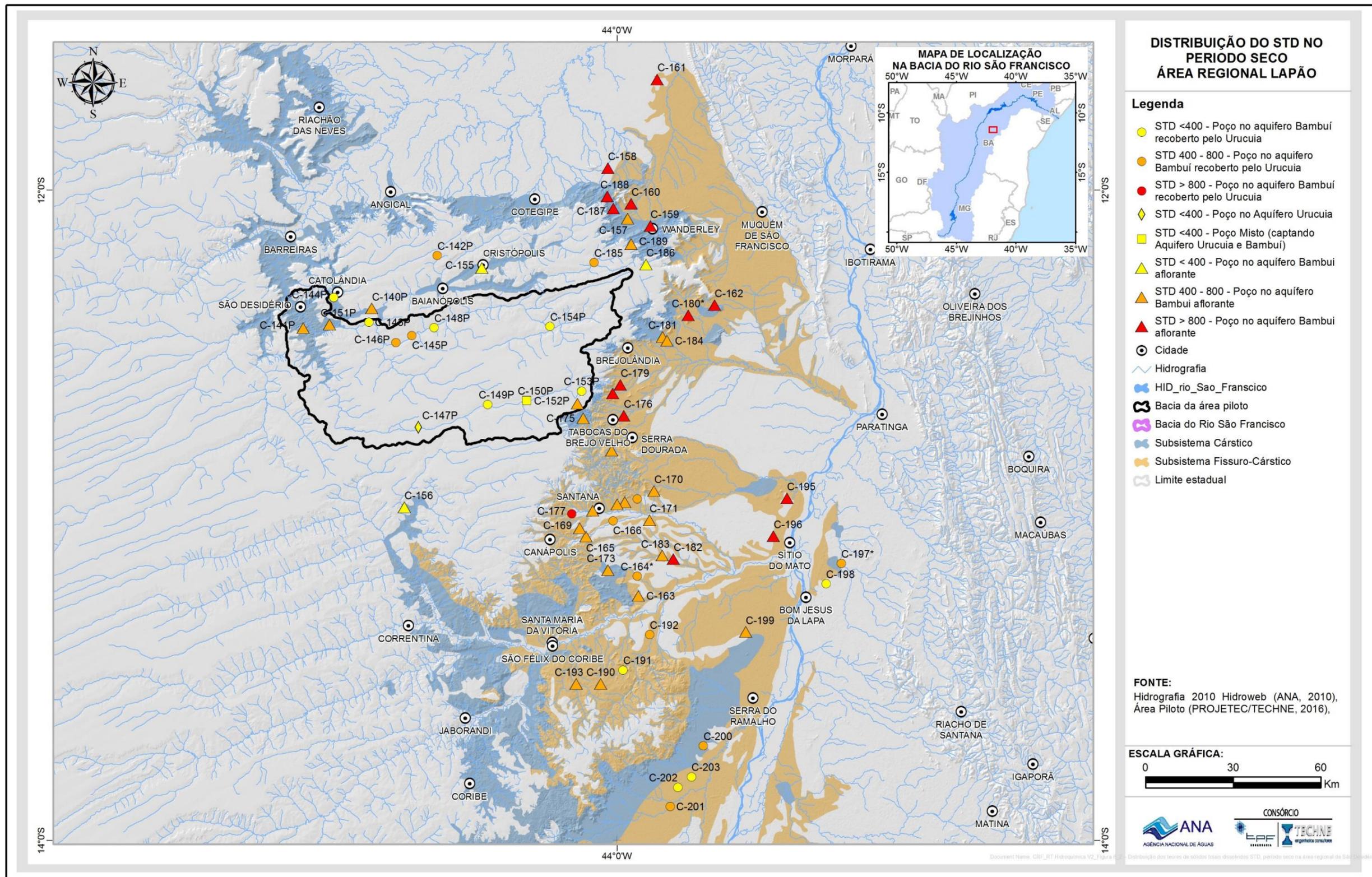


Figura 6.2 – Distribuição dos teores de sólidos totais dissolvidos (STD), período seco na área regional de São Desidério.

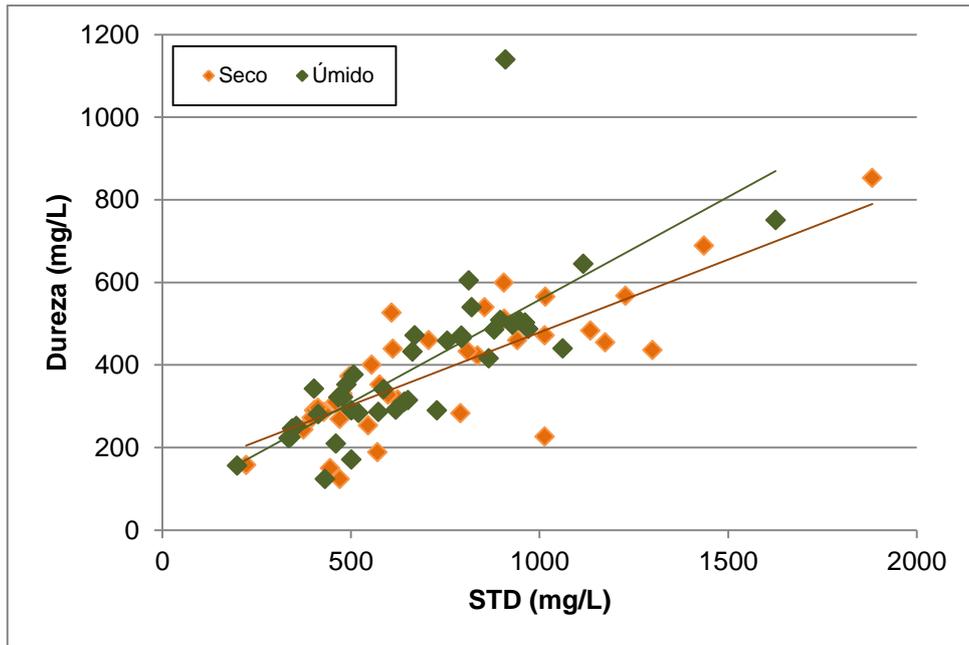


Figura 6.3 - Correlação entre STD e dureza para as águas do Bambuí aflorante nos períodos seco e úmido.

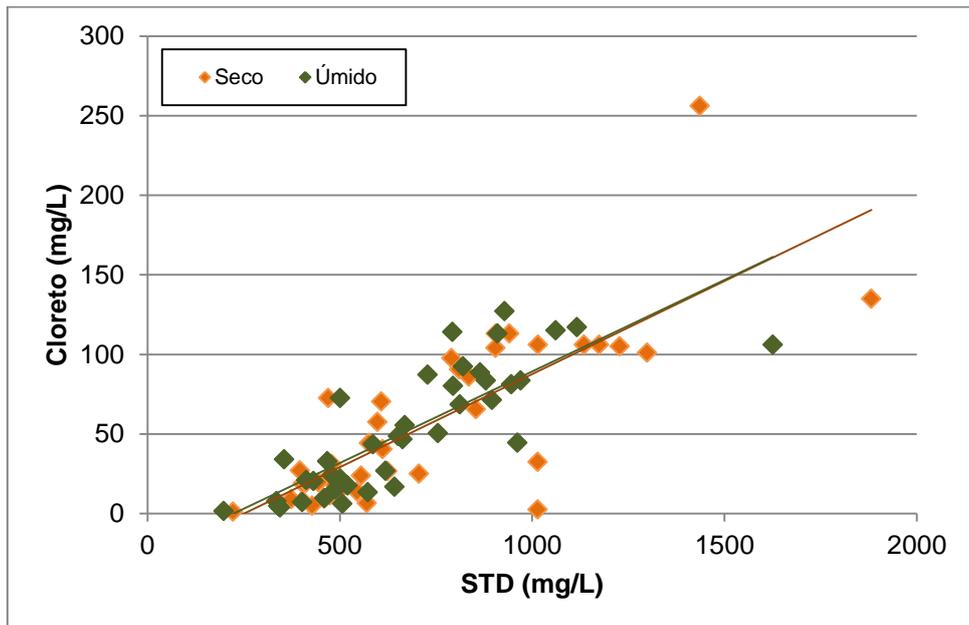


Figura 6.4 - Correlação entre STD e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.

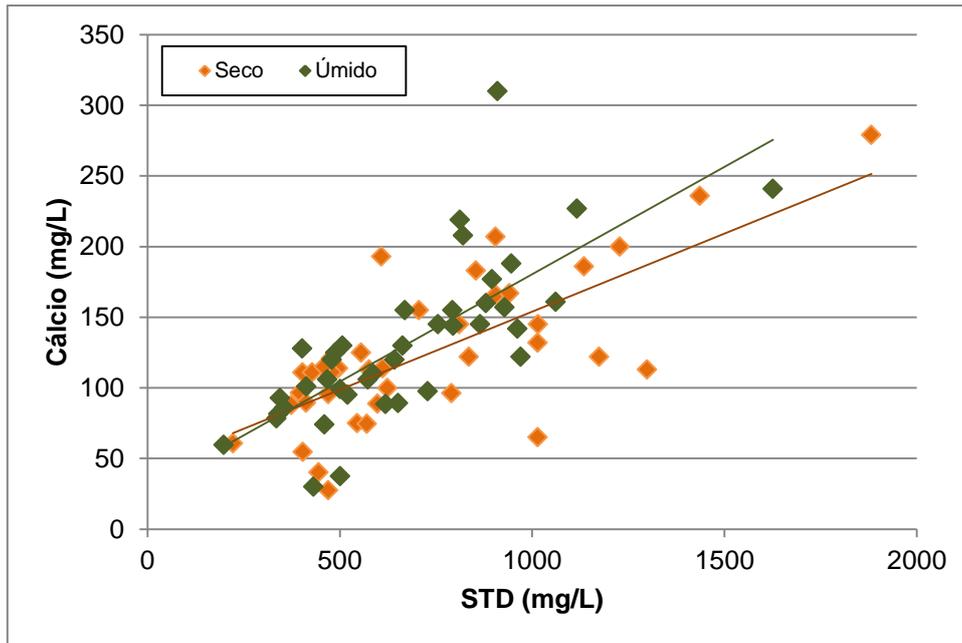


Figura 6.5 - Correlação entre STD e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.

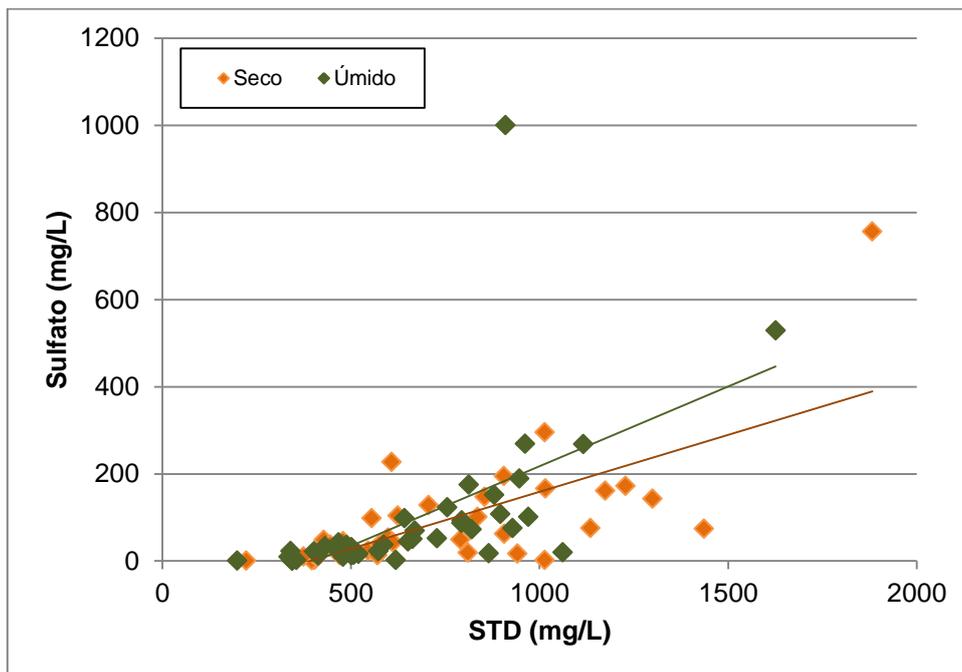


Figura 6.6 - Correlação entre STD e sulfato para as águas do Bambuí aflorante, nos períodos seco e úmido.

A CE no Bambuí aflorante apresenta um comportamento, de certa forma, oposto ao STD, mostrando valores levemente mais altos no período úmido (média 1003,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$) em relação ao período seco (média de 961,03 $\mu\text{S}/\text{cm}$). As diferenças são discretas e provavelmente derivam de problemas analíticos e não propriamente a aspectos hidroquímicos. A CE foi obtida em campo mediante sonda multiparamétrica e o STD em laboratório por gravimetria.

Nesses casos, consideram-se mais confiáveis os resultados determinados em laboratório.

Os valores de temperatura das amostras, no Bambuí aflorante, oscilaram entre 23,60 a 30,30°C, com valores de média e de mediana em torno de 27 °C (Tabela 6.1), para o período seco. No úmido os valores de temperatura variaram entre 23,90 a 30,20 °C, com média e mediana por volta de 26,50°C (Tabela 6.1). Nota-se, que os comportamentos das temperaturas no interior do poço nos dois períodos são semelhantes. Ressalta-se que a temperatura medida em campo não representa o valor real da água do aquífero, mas equivale a temperatura da água no interior do poço. Dessa forma, acredita-se que variação de temperatura aqui evidenciada, não está influenciando o comportamento do CO₂ dissolvido nessas águas, e nem refletindo no teor de cálcio, já que para acontecer escape de CO₂ e precipitação de CaCO₃, seria necessário um aumento mais significativo da temperatura da água do aquífero.

Os valores pH do Bambuí aflorante, nos diferentes períodos de campanha, apresentam valores levemente alcalinos, com média e mediana próximos a 7,5 (Tabela 6.1), indicando, ainda, que não ocorreram grandes variações entre os períodos de amostragem. As medidas demonstram uma baixa amplitude dos valores de pH (pequenas variações obtidas entre os valores máximos e mínimos), tornando menores os valores do desvio padrão. O comportamento dessa distribuição, também, pode ser evidenciado nos coeficientes de variação, que são baixos, refletindo uma dispersão de valores relativamente pequena. Estas características decorrem da dominância do caráter neutro a alcalino das águas. Importante ressaltar que na área de São Desidério, os valores do pH 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). Não se apresenta, 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 íons principais, para as duas campanhas de coletas de amostra de água, o bicarbonato é o principal ânion destas águas, com teores, no Bambuí aflorante, variando entre 175 (C-156) e 500 mg/L (C-180), com média de 375,90 mg/L no período seco e de 181,00 (C-156) a 481,00 mg/L (C-180), com média de 368,33 mg/L no período úmido (Tabela 6.1).

O sulfato é um ânion que ocorre em variadas concentrações nas águas do Bambuí aflorante. No período seco os teores variaram de 0,50 (C-156) a 756,00 mg/L (C-159) e média de 87,60 mg/L, enquanto no período úmido variaram de 0,25 (C-140) a 1000 mg/L (C-180), e média de 98,80 mg/L (Tabela 6.1). Nota-se que, nas duas campanhas, os teores de sulfato mostraram uma considerável amplitude, produzindo altos valores do desvio padrão. As concentrações de sulfato na área registram 10 poços, no período seco, com valores superiores a 100 mg/L, sendo que sete deles (C-159, C-160, C-162, C-169, C-176, C-178, C-180, C-181, C-187, e C-188) estão situados nas porções norte e nordeste da área. Na parte leste estão os poços C-176 e C-178 e na parte sul o poço C-169. É importante salientar que um dos poços da parte norte (C-159) é fortemente anômalo tanto no período úmido (529,62 mg/L), como no

seco (756 mg/L). O poço C-180, localizado na parte nordeste, também tem valores anômalos de sulfato, principalmente no período úmido.

Nota-se, portanto, uma tendência de teores mais altos de sulfato, especialmente na parte norte/nordeste da área, podendo ter uma origem antrópica, proveniente de corretivos agrícolas e fertilizantes, de agrotóxicos e de seus resíduos, bem como efluentes domésticos. Convém ressaltar que não foram detectados agroquímicos em nenhuma das amostras avaliadas e nem compostos nitrogenados em quantidades significativas, portanto, esses teores podem ainda estar relacionados à ocorrência localizada de ambiente redutor, disseminados nos calcários, propício a originar sulfetos. Entretanto, os dados aqui apresentados não são suficientes para definir a origem exata dos sulfatos dissolvidos nas águas do aquífero Bambuí aflorante na área.

O cloreto, a exemplo do sulfato, apresenta também amplas variações de teores para águas do Bambuí aflorante. No período seco, os teores de cloreto estão entre 1,20 (C-156) a 256,00 mg/L (C-182), com média de 55,48 mg/L; enquanto que no período úmido, os teores variam de 1,42 (C-156) a 127,00 mg/L (C-179), com média de 51,84 mg/L (Tabela 6.1). Apenas o poço C-182, localizado na parte sudeste da área, no município de Santana, registra teor mais elevado, acima de 250 mg/L, possivelmente relacionado a fatores antrópicos.

Dentre os cátions, o cálcio se destaca nas amostras de águas do aquífero Bambuí, apresentando discretas variações entre os períodos de coleta. Os teores de cálcio variaram de 27,60 (C-167) a 279,00 mg/L (C-159), com média de 113,50 mg/L, enquanto no período úmido oscilaram de 30,00 (C-184) a 310 mg/L (C-180) e média de 123,50 mg/L (Tabela 6.1). Ressalta-se que os teores acima ou próximo de 100 mg/L refletem a litologia calcária característica da área, representada pelo Grupo Bambuí.

Entretanto, os poços C-156, C-158, C-167, C-172 e C-184 com menores teores de cálcio ocorrem de forma dispersa na área, estando, possivelmente, relacionados com a influência do Urucuia no quimismo das águas do Bambuí, já que os arenitos do Grupo Urucuia se apresentam de forma expressiva entre os corpos de calcários. Outra explicação, além das possíveis misturas de águas, seria a de processos de troca catiônica no interior do aquífero carbonático.

O magnésio apresenta todas as amostras de água, nos dois períodos de coletas, teores menores do que o de cálcio. No período seco os teores de magnésio nessas águas estão entre 0,67 (C-190) a 49,40, mg/L (C-180), com média de 17,85 mg/L e no período úmido, os teores variam de 1,50 (C-156) a 88,00 mg/L (C-180), com média de 16,58 mg/L (Tabela 6.1).

O sódio nas águas do aquífero Bambuí aflorante predomina em relação aos teores de potássio. Os teores de sódio estão entre 1,34 (C-156) a 232,00 mg/L (C-159), com média de 48,29 mg/L, no período seco. No período úmido os teores de sódio variam de 1,58 (C-156) a 195 mg/L (C-159), com média de 45,21 mg/L (Tabela 6.1). Já para o potássio, no período seco, as amostras de água mostram variações de 0,31 (C-156) a 6,74 mg/L (C-190), com média de 2,34 mg/L e no período úmido oscilaram de 0,30 (C-156) a 8,25 mg/L (C-163),

com média de 2,45 mg/L (Tabela 6.1).

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 CaCO₃ (C-159), com média de 382,58 mg/L de CaCO₃. 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 CaCO₃ (C-159), com média de 396,00 mg/L de CaCO₃ (Tabela 6.1). Os maiores valores da dureza estão localizados na faixa leste da área (triângulos vermelhos da Figura 6.7), seguindo a mesma tendência do STD (ver Figura 6.2),

Essas águas se enquadram, portanto, como duras a muito duras, segundo a classificação de Custódio & Llamas, 2001 (Tabela 6.4). 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 6.8 a Figura 6.10).

Tabela 6.4 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO₃), segundo Custódio & Llamas, 2001.

| Tipo | Teor de CaCO₃ (mg/L) |
|-------------------|--|
| Branda | < 50 |
| Pouco Dura | 50 – 100 |
| Dura | 100 – 200 |
| Muito Dura | > 200 |

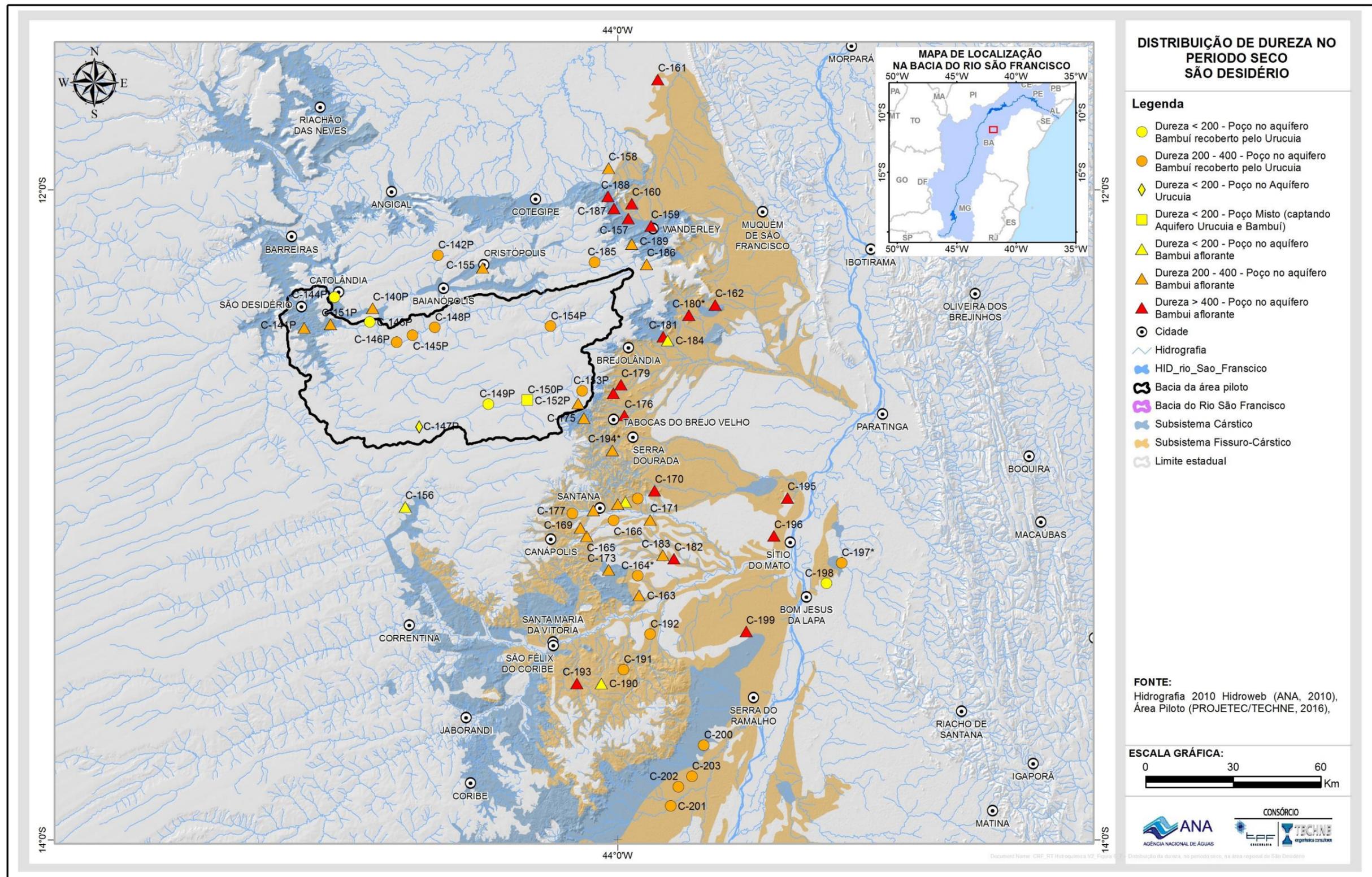


Figura 6.7 – Distribuição da dureza, no período seco, na área regional de São Desidério.

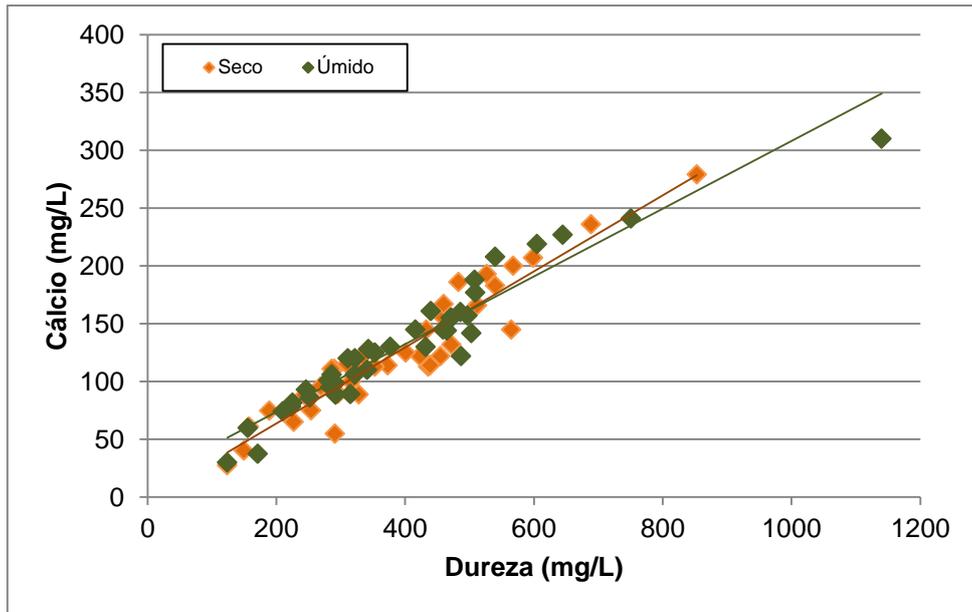


Figura 6.8 - Correlação entre dureza e cálcio para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido.

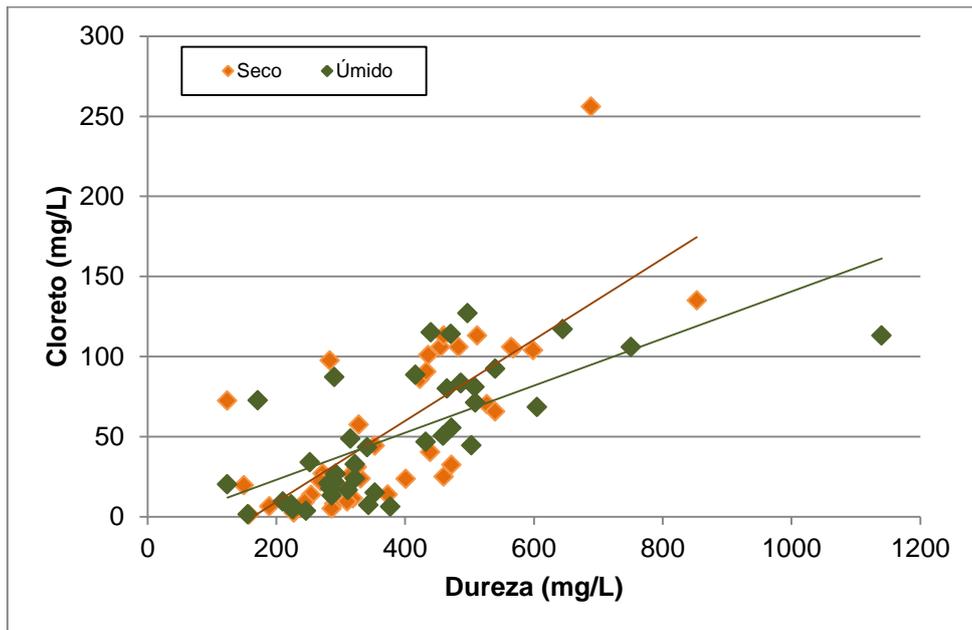


Figura 6.9 - Correlação entre dureza e cloreto para as águas do Bambuí aflorante, para os períodos seco e úmido

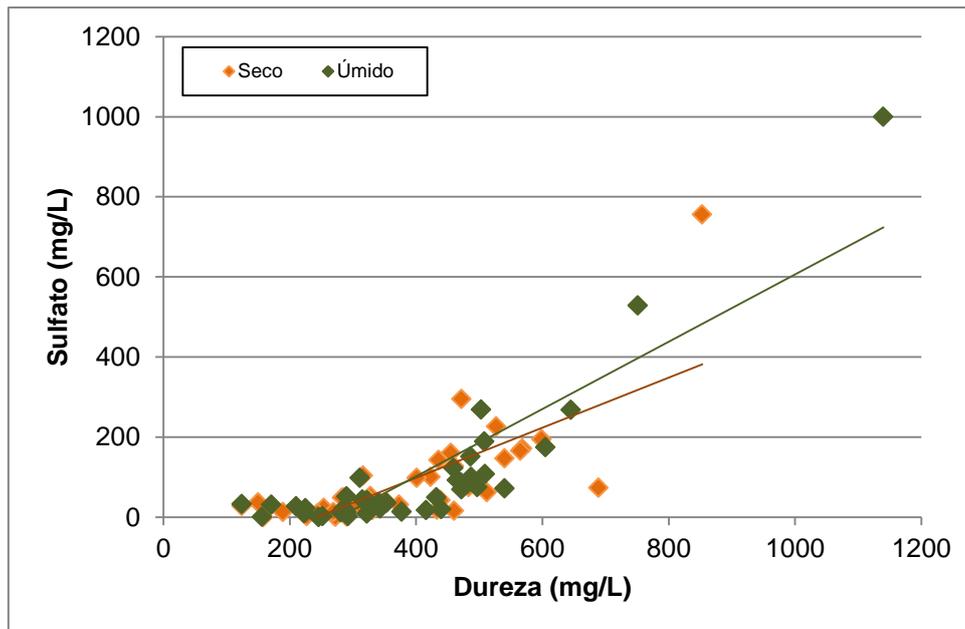


Figura 6.10 - Correlação entre dureza e sulfato para as águas do Bambuí

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 6.1). Na primeira campanha, representando o período seco, o ferro variou de 0,01 (C-161) a 3,63 (C-182), com média de 0,38 mg/L. Na segunda campanha, realizado no período úmido, as variações foram de 0,01 (C-184.) a 36, 10 mg/L (C-169), com média de 1,73 mg/L (Tabela 6.1). 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 6.1). 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 (Figura 6.1), 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 (NO₃⁻). Compostos nitrogenados como a amônia (NH₄⁺), podem oxidar-se para nitrito (NO₂⁻), que em seguida é convertido em nitrato (NO₃⁻), 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 6.1). 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.

6.1.2 Amostras do Bambuí com cobertura

As águas do Bambuí com cobertura são pouco mineralizadas, a exemplo do Bambuí aflorante. De acordo com a Tabela 6.2, 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 6.2, 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) (Tabela 6.3), as águas do aquífero Bambuí recoberto são dominante doces, com todas as amostras com valores abaixo de 1000 mg/L

A Figura 6.11 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 6.1 e Tabela 6.2). 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 Urucuia 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 (Figura 6.11) mostra, em 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).

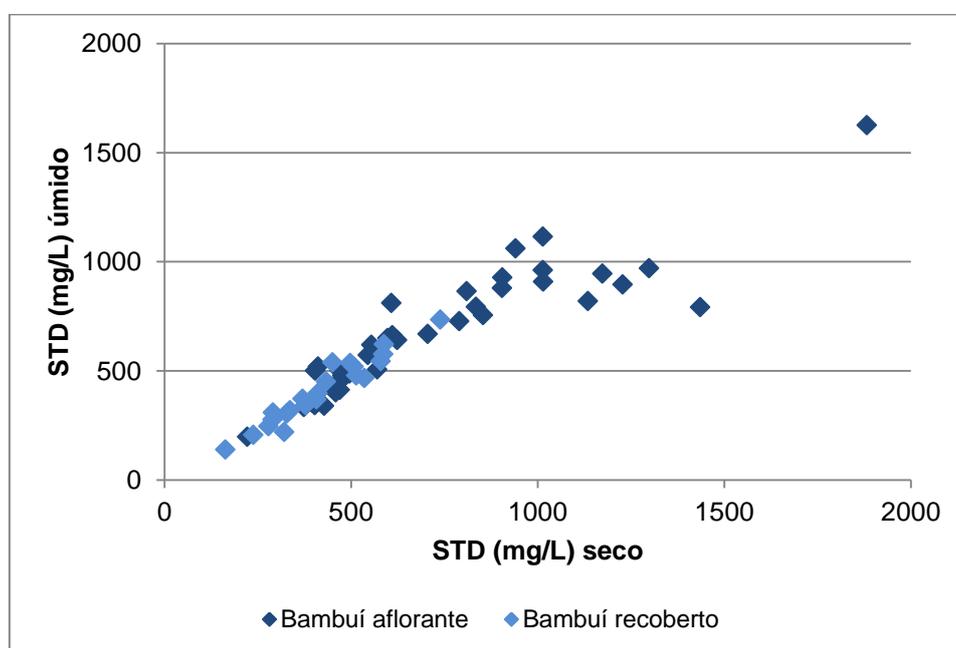


Figura 6.11 - Correlação entre STD (seco) e STD (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto.

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 6.2). 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.

As temperaturas, medidas em campo nas amostras do Bambuí recoberto, mostram valores das médias iguais (26,5 mg/L), para ambos os períodos de amostragem. Demonstra, portanto, que a temperatura da água no interior dos poços não apresenta variações para os períodos de coletas (Tabela 6.2) e nem entre os distintos ambientes hidrogeológicos, quando comparados com os valores médios do aquífero Bambuí aflorante (Tabela 6.1).

Nas águas subterrâneas do Bambuí com cobertura, a exemplo do Bambuí aflorante, o ânion dominante é o íon bicarbonato, sendo responsável, juntamente com o cálcio, pela mineralização das águas dos poços amostrados. No período seco foi constatado um intervalo de variação de 132,00 (C-143) a 408,00 mg/L (C-177), com média de 271,73 mg/L e desvio de 76,45 mg/L. No período úmido os resultados variaram de 124,00 (C-143) a 391,00 mg/L (C-177), com média de 262,50 mg/L e desvio padrão de 77,64 mg/L (Tabela 6.2). Salienta-se que, possivelmente, o processo de carstificação exerce controle na elevação desses teores.

Nota-se que os teores de bicarbonato no Bambuí aflorante estão ligeiramente mais elevados do que o Bambuí recoberto, conforme ilustrado na Figura 6.12, refletindo um maior domínio do processo de carstificação no ambiente do Bambuí aflorante, que certamente exerce controle na elevação dos teores de bicarbonato, proporcionando maior dissolução dos carbonatos da área.

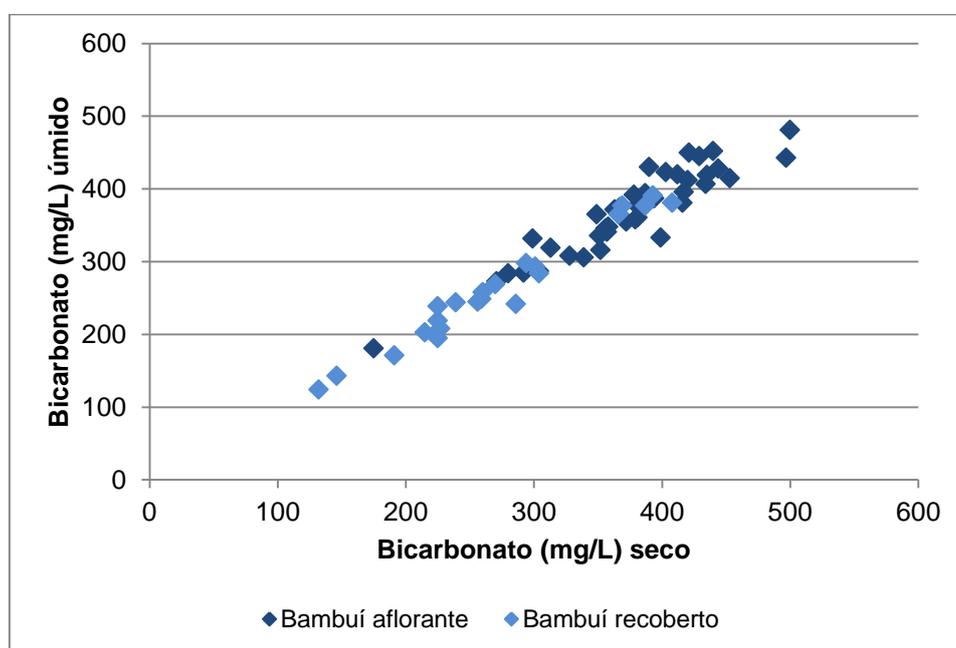


Figura 6.12 - Correlação entre bicarbonato (seco) e bicarbonato (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido.

Para os outros ânions principais, o cloreto é mais expressivo do que o sulfato. Nas águas do aquífero Bambuí recoberto, o cloreto ocorre no período seco, em teores de 1,95 (C-143) a 142,00 mg/L (C-146), com média de 34,15 mg/L. No período úmido os teores variaram de 2,50 (C-143) a 91,60 mg/L (C-145), com média de 27,60 mg/L.

Observa-se que os teores de cloreto nas águas do aquífero Bambuí recoberto são levemente mais baixos quando comparados aos teores do aquífero Bambuí aflorante, nos dois períodos sazonais (Tabela 6.1 e Tabela 6.2). Esse comportamento, certamente, está relacionado à expressiva cobertura arenítica Uruçuia, que por possuir alta permeabilidade vertical e horizontal, favorece a entrada de água de chuva e, por conseguinte, a rápida renovação de água, principalmente nas partes mais cársticas e fraturadas da área. Em relação ao

aquífero Bambuí aflorante, ele pode estar localizado em zonas de recargas reduzidas e, conseqüentemente, possuindo lenta renovação de água, que favorece o aumento da concentração de cloreto em suas águas.

Os teores de sulfato, obtidos nas águas do aquífero Bambuí recoberto pelo arenito Urucuia, se encontram em quantidades inferiores a 70 mg/L. No período seco variou de 0,50 (C-153) a 62,50 mg/L (C-166) e no período úmido, os teores variaram de 0,50 (C-153) a 55,60 mg/L (C-166). Os teores de sulfato no aquífero Bambuí recoberto são mais baixos do que no aquífero Bambuí aflorante, nos dois períodos de amostragem (Tabela 6.1 e Tabela 6.2)

Para os cátions, no Bambuí com cobertura, observa-se na Tabela 6.2 que o íon cálcio predomina amplamente sobre os íons sódio e magnésio e, esse sobre o íon potássio.

O cálcio varia de 44,10 (C-191) a 126,00 mg/L (C-166), com média de 86,20 mg/L e mediana de 80,80 mg/L para o período seco. No período úmido o cálcio apresentou média de 79,48 mg/L, com mediana de 78,10 mg/L e valores mínimo e máximo de 31,30 (C-153) e 123,00 mg/L (C-166), respectivamente (Tabela 6.2).

A Figura 6.13 mostra a relação do cálcio nos diferentes períodos de coleta, para os distintos ambientes hidrogeológicos. Nota-se, que o cálcio no Bambuí com cobertura registra teores menores que no Bambuí aflorante. Isso evidencia, portanto, que a cobertura arenítica do Urucuia permite o abrandamento das águas do Bambuí nos locais em que esse se encontra recoberto pelo pacote sedimentar do Urucuia, com diminuição dos teores de cálcio.

Os teores de sódio são um pouco maiores do que os teores de magnésio, podendo estar relacionados à presença de níveis pelíticos na cobertura arenítica, que promovem, localmente, o enriquecimento em sódio por meio do processo de troca de bases. No período seco os teores variaram de 2,60 (C-149) a 99,90 mg/L (C-168), com média de 21,08 mg/L, e no período úmido as variações ocorreram no intervalo de 1,90 (C-202) a 49,30 mg/L (C-166), com média 17,78 mg/L (Tabela 6.2).

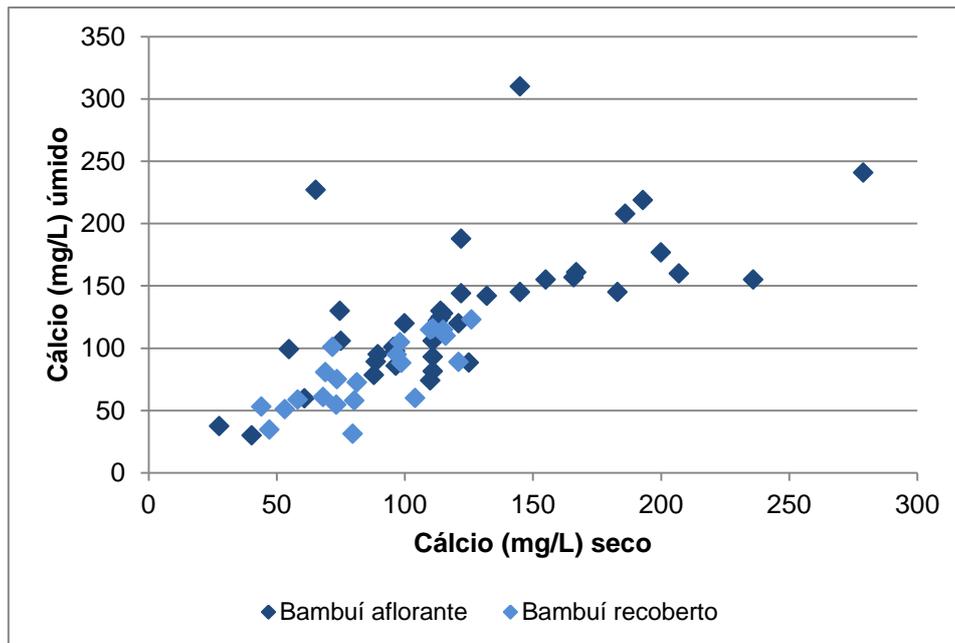


Figura 6.13 - Correlação entre cálcio (seco) e cálcio (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido.

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) (Tabela 6.4). 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 6.7 e no diagrama de dispersão da Figura 6.13. A Figura 6.14 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).

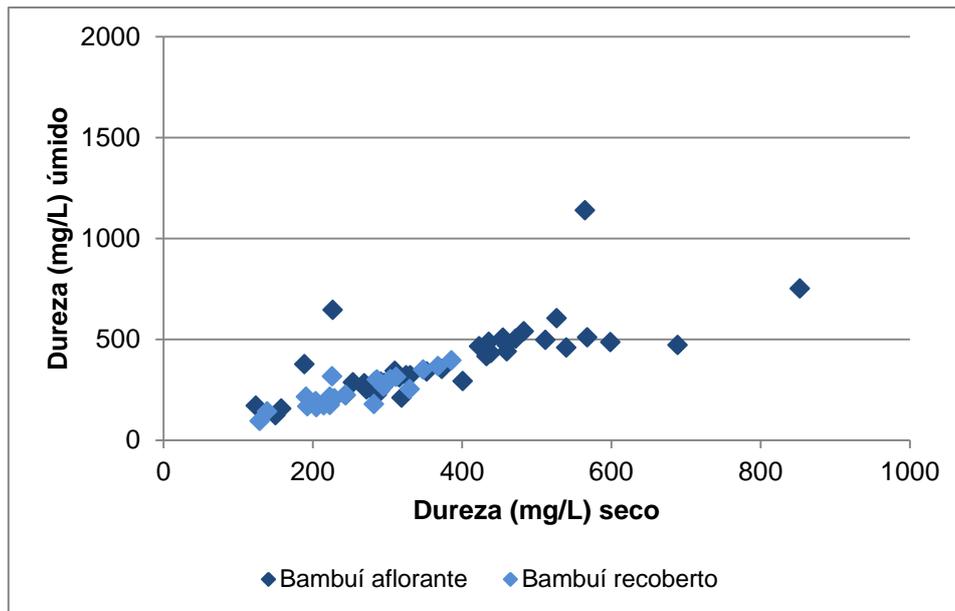


Figura 6.13 - Correlação entre dureza (seco) e dureza (úmido) para as águas do Bambuí aflorante e Bambuí recoberto, para os períodos seco e úmido.

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 mostram, predominante, teores baixos. 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 6.2). 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.

6.1.3 Amostras Poço Urucuia e Poço Misto

A Tabela 6.5 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 6.4).

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 6.5).

Tabela 6.5 – 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 |

6.2 - Caracterização de grupos através de diagramas Box & Whisker

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

A Figura 6.14 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 6.14) 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.

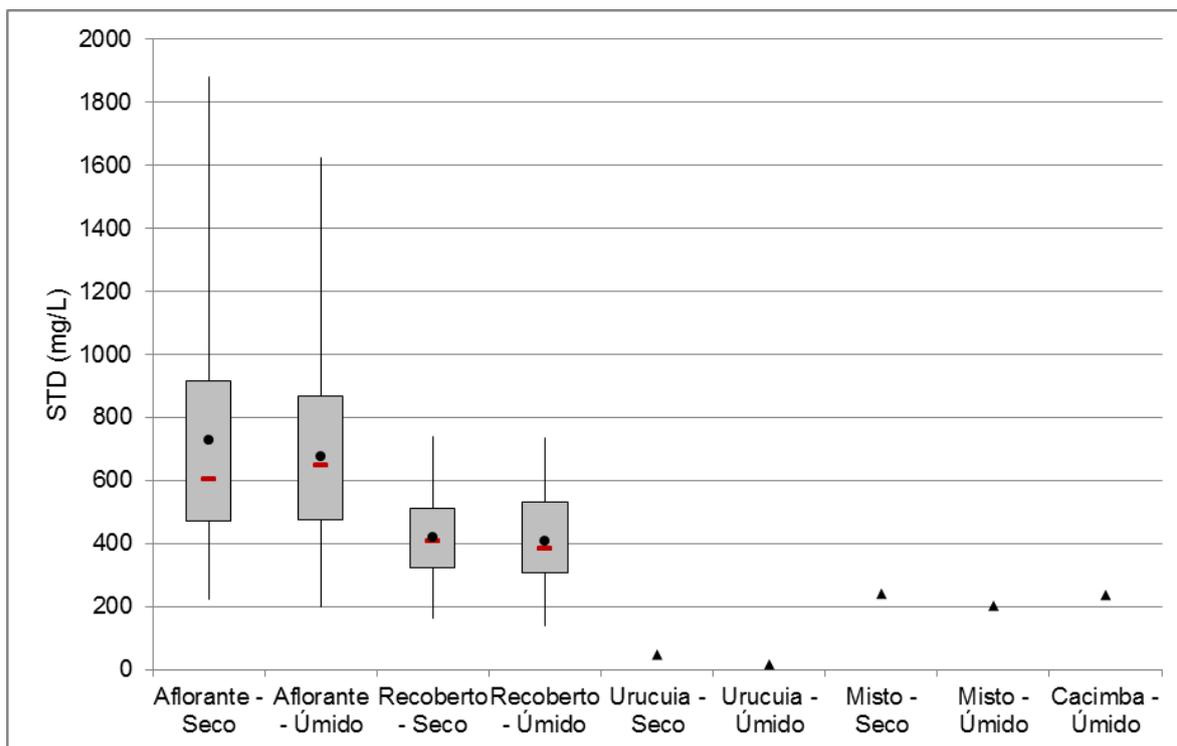


Figura 6.141 - Diagramas box plot representando os valores de STD para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.

* 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.

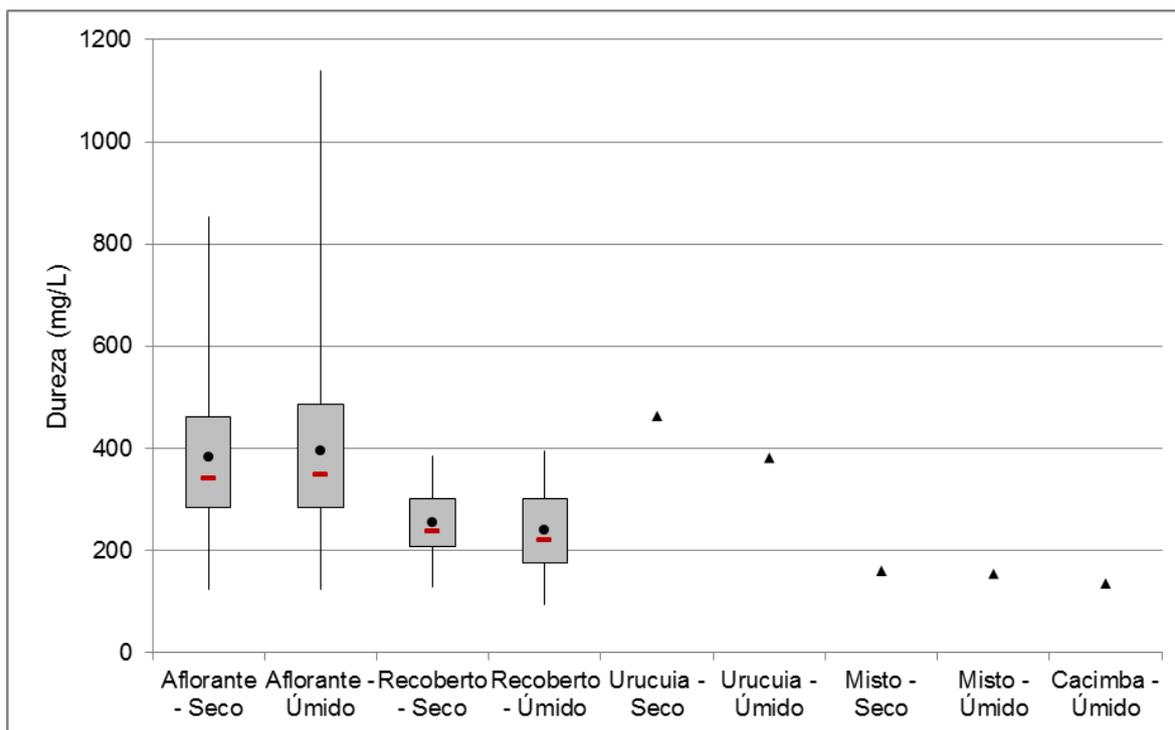


Figura 6.15 - Diagramas box plot representando os valores de Dureza para os diferentes grupos de poços, para o período de coleta seco e úmido.

*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.

6.3 Fácies hidroquímicas

Nas Figuras 6.16 e Figura 6.17 (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. A Tabela 6.6 informa a fácies hidroquímica de cada amostra avaliada.

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.

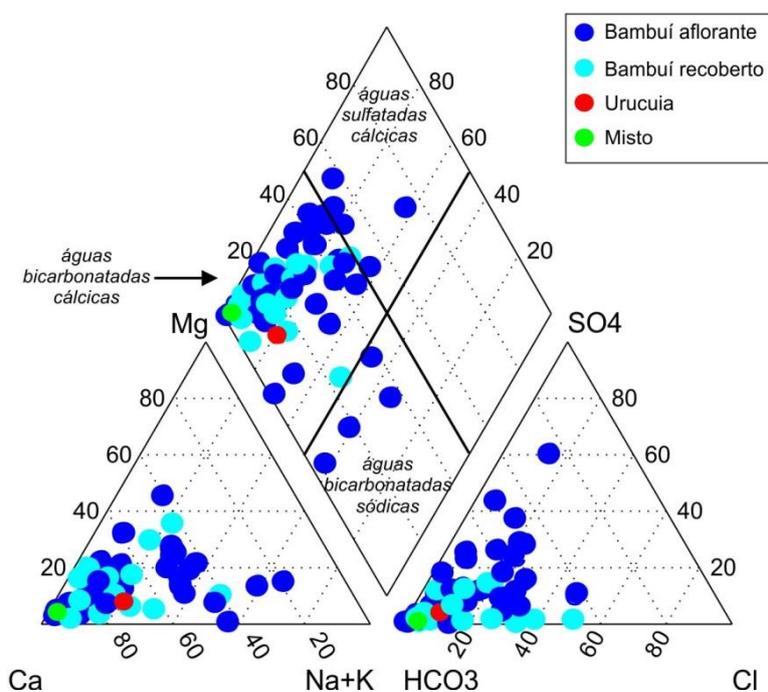


Figura 6.16 – Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco, na área regional de São Desidério.

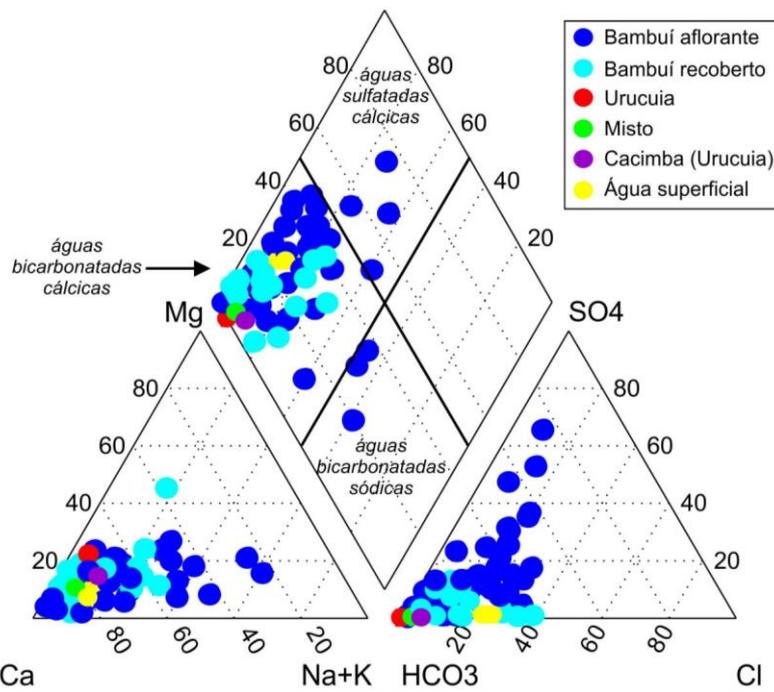


Figura 6.17 – Diagrama de Piper das amostras coletadas no período úmido, na área regional de São Desidério.

Tabela 6.6 - Fácies hidroquímicas e STD (mg/L) das águas avaliadas na área regional de São Desidério.

| ID | Grupo | Seco | | Úmido | |
|--------|--------------------------------|----------------------|------------|-------------------|------------|
| | | Fácies | STD (mg/L) | Fácies | STD (mg/L) |
| C-140 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 403 | Ca-HCO3 | 344 |
| C-151 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 477 | Ca-HCO3 | 479 |
| C-152 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 428 | Ca-HCO3 | 340 |
| C-155 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 396 | Ca-HCO3 | 355 |
| C-156 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 222 | Ca-HCO3 | 198 |
| C-173 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 470 | Ca-HCO3 | 413 |
| C-175 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 474 | Ca-Na-HCO3 | 460 |
| C-183 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 479 | Ca-HCO3 | 467 |
| C-186 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 374 | Ca-HCO3 | 335 |
| C-189 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 459 | Ca-HCO3 | 402 |
| C-194 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3 | 576 | Ca-HCO3 | 586 |
| C-141 | BambuÍ aflorante | Ca-Mg-HCO3 | 496 | Ca-HCO3 | 488 |
| C-165 | BambuÍ aflorante | Ca-Mg-HCO3 | 412 | Ca-HCO3 | 520 |
| C-199 | BambuÍ aflorante | Ca-Mg-HCO3 | 611 | Ca-Mg-HCO3 | 663 |
| C-184 | BambuÍ aflorante | Na-Ca-HCO3 | 445 | Na-Ca-HCO3 | 431 |
| C-190 | BambuÍ aflorante | Na-Ca-HCO3 | 570 | Ca-HCO3 | 507 |
| C-161 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-Cl | 1135 | Ca-HCO3-Cl | 820 |
| C-179 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-Cl | 906 | Ca-HCO3-Cl | 928 |
| C-195 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-Cl | 941 | Ca-HCO3-Cl | 1061 |
| C-196 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-Cl | 810 | Ca-HCO3-Cl | 865 |
| C-157 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-SO4 | 608 | Ca-HCO3-SO4 | 812 |
| C-181 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-SO4 | 706 | Ca-Na-HCO3 | 669 |
| C-188 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-SO4 | 854 | Ca-HCO3-SO4 | 755 |
| C-158 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-HCO3 | 1014 | Ca-Na-HCO3-SO4-Cl | 1116 |
| C-172 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-HCO3 | 545 | Ca-HCO3 | 573 |
| C-160 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-SO4-Cl | 1228 | Ca-HCO3 | 896 |
| C-187 | BambuÍ aflorante | Ca-HCO3-SO4-Cl | 905 | Ca-Na-HCO3-SO4 | 880 |
| C-159 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-SO4-HCO3 | 1882 | Ca-Na-SO4-HCO3 | 1626 |
| C-162 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-Mg-HCO3-SO4-Cl | 1299 | Ca-Na-Mg-HCO3 | 970 |
| C-163 | BambuÍ aflorante | Mg-Ca-HCO3 | 404 | Ca-HCO3 | 501 |
| C-167 | BambuÍ aflorante | Na-HCO3-Cl | 470 | Na-Ca-Mg-HCO3-Cl | 501 |
| C-169 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-HCO3-SO4 | 624 | Ca-HCO3-SO4 | 642 |
| C-170 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-Mg-HCO3-Cl | 835 | Ca-HCO3 | 794 |
| C-171 | BambuÍ aflorante | Na-Ca-HCO3-Cl | 790 | Na-Ca-HCO3-Cl | 728 |
| C-174 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-Mg-HCO3 | 598 | Ca-Na-Mg-HCO3 | 651 |
| C-176 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-Mg-HCO3-SO4-Cl | 1174 | Ca-HCO3-SO4 | 946 |
| C-178 | BambuÍ aflorante | Ca-Na-HCO3-SO4 | 1014 | Ca-Na-HCO3-SO4 | 962 |
| C-180 | BambuÍ aflorante | Ca-Mg-Na-HCO3-SO4-Cl | 1015 | Ca-Na-Mg-SO4-HCO3 | 910 |
| C-182 | BambuÍ aflorante | Ca-Cl-HCO3 | 1436 | Ca-HCO3-Cl | 793 |
| C-193 | BambuÍ aflorante | Ca-Mg-HCO3-SO4 | 555 | Ca-Mg-HCO3 | 619 |
| C-142 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 514 | Ca-HCO3 | 480 |
| C-143 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 163 | Ca-HCO3 | 140 |
| C-144 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 279 | Ca-HCO3 | 247 |
| C-148 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 321 | Ca-HCO3 | 221 |
| C-149 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 238 | Ca-HCO3 | 207 |
| C-153 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 291 | Mg-Ca-HCO3 | 310 |
| C-164 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 450 | Ca-Na-HCO3 | 540 |
| C-177 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 587 | Ca-HCO3 | 578 |
| C-185 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 507 | Ca-HCO3 | 521 |
| C-192 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 433 | Ca-HCO3 | 451 |
| C-198 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 337 | Ca-HCO3 | 320 |
| C-200 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 407 | Ca-HCO3 | 370 |
| C-202 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 328 | Ca-HCO3 | 306 |
| C-203 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3 | 290 | Ca-HCO3 | 278 |
| C-154 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3-Cl | 370 | Ca-Na-HCO3-Cl | 372 |
| C-166 | BambuÍ recoberto | Ca-HCO3-Cl | 588 | Ca-Na-HCO3 | 623 |
| C-168 | BambuÍ recoberto | Na-Ca-HCO3 | 580 | Ca-Na-HCO3 | 545 |
| C-201 | BambuÍ recoberto | Ca-Mg-HCO3 | 498 | Ca-HCO3 | 537 |
| C-145 | BambuÍ recoberto | Ca-Na-HCO3-Cl | 536 | Ca-Na-HCO3-Cl | 467 |
| C-146 | BambuÍ recoberto | Ca-Na-Cl-HCO3 | 739 | Ca-Na-HCO3 | 735 |
| C-191 | BambuÍ recoberto | Ca-Mg-Na-HCO3 | 378 | Ca-Mg-Na-HCO3 | 343 |
| C-197 | BambuÍ recoberto | Ca-Mg-HCO3-Cl | 411 | Ca-Mg-HCO3-Cl | 397 |
| C-147 | Urucuia | Ca-HCO3 | 48 | Ca-HCO3 | 17 |
| C-150 | Misto | Ca-HCO3 | 241 | Ca-HCO3 | 203 |
| C-204 | Cacimba Urucuia | - | - | Ca-Na-HCO3 | 237 |
| CS-205 | Nascente do Rio João Rodrigues | - | - | Ca-HCO3-Cl | 305 |
| CS-210 | Surgência do Poço do Surubim | - | - | Ca-HCO3-Cl | 273 |

6.4 Parâmetros Específicos

6.4.1 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 Figura 4.3 e os resultados analíticos apresentados na Tabela 6.7. 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 6.7 – 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 | VMP¹ | | | | | | | |
| 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 nº 2914/202.

6.4.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 10 amostras (5 poços e 5 superficiais) na área de São Desidério, conforme Tabela 6.8 cuja localização encontra-se na Figura 4.3. 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 capítulo 2 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 Bambuí 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 6.8 – 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) |

6.4.3 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 6.9) Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 6.9 – Pontos de coleta para determinação de derivados de petróleo.

| Amostra | | Bambuí aflorante | | | | Bambuí 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 n° 2914/2011

6.5 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.

Os guias atuais para determinar a potabilidade das águas baseiam-se em dois critérios distintos:

- Risco a saúde: diz respeito aos efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos da água. Representam uma série de constituintes químicos (que são fixados por concentrações máximas permitidas) e bacteriológicos.
- Aspectos organolépticos (ou estéticos): conjunto de parâmetros caracterizados por provocar estímulos sensoriais que afetam a aceitação para consumo humano, mas que não necessariamente implicam risco à saúde.

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 6.10 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 6.11 (substâncias organolépticas).

Tabela 6.10 - 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 6.11 - 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. Os referidos parâmetros e os teores obtidos são apresentados nas Figuras 6.18 a Figura 6.25. Para as demais unidades amostrais apenas o poço no Urucuia excedeu o VMP para o ferro no período úmido.

A Tabela 6.12 sumariza o percentual de amostras impróprias para o consumo humano para cada parâmetro avaliado. Verifica-se que as águas do aquífero Bambuí aflorante apresentam mais resultados superiores ao VMP, quando comparadas ao aquífero Bambuí recoberto.

Destacam-se os parâmetros STD, dureza, ferro e manganês. Os demais parâmetros apresentam valores acima do VMP de forma pontual. A presença de sólidos totais dissolvidos nessas águas deve-se, provavelmente, a fatores climáticos e de circulação das águas no meio aquífero. A dureza das águas é controlada pela composição do arcabouço litológico que através da sua dissolução incrementa em cálcio e magnésio as águas do aquífero.

A presença do ferro e manganês nas águas do aquífero Bambuí pode estar relacionada às características construtivas dos poços, principalmente, nos aspectos de revestimento e de setores da bomba em que a água fica em contato. Não fica descartada a origem litológica desses elementos, já que alguns minerais carbonáticos tem ferro na sua composição. O ferro no aquífero Urucuia não se deve a aspectos construtivos, já que o poço conta com revestimento em PVC geomecânico (tubo e filtros). Nesse caso, a origem do ferro nessas águas pode estar relacionada à presença de óxidos de ferro na matriz desses arenitos (Iglesias & Uhlein, 2009).

A presença de íons ferro e manganês na água de abastecimento destinada ao uso doméstico é desagradável, pois pode provocar o tingimento de roupas e louças, mas não representa riscos à saúde, uma vez que não há comprovação de efeitos tóxicos quando ingeridos em grandes quantidades.

Tabela 6.12 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria n° 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano.

| Parâmetro | Bambuí aflorante (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) |

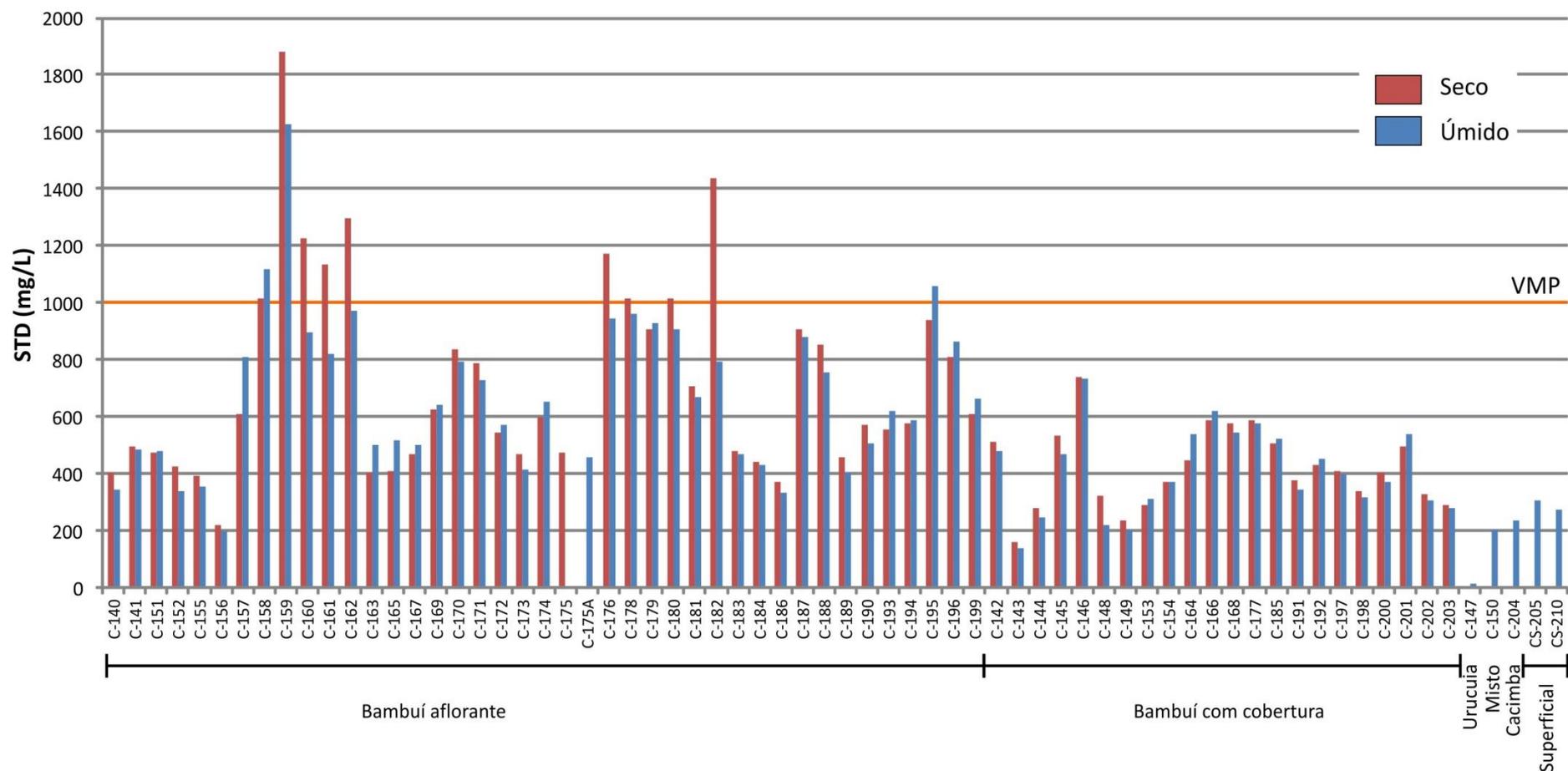


Figura 6.18 – Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP

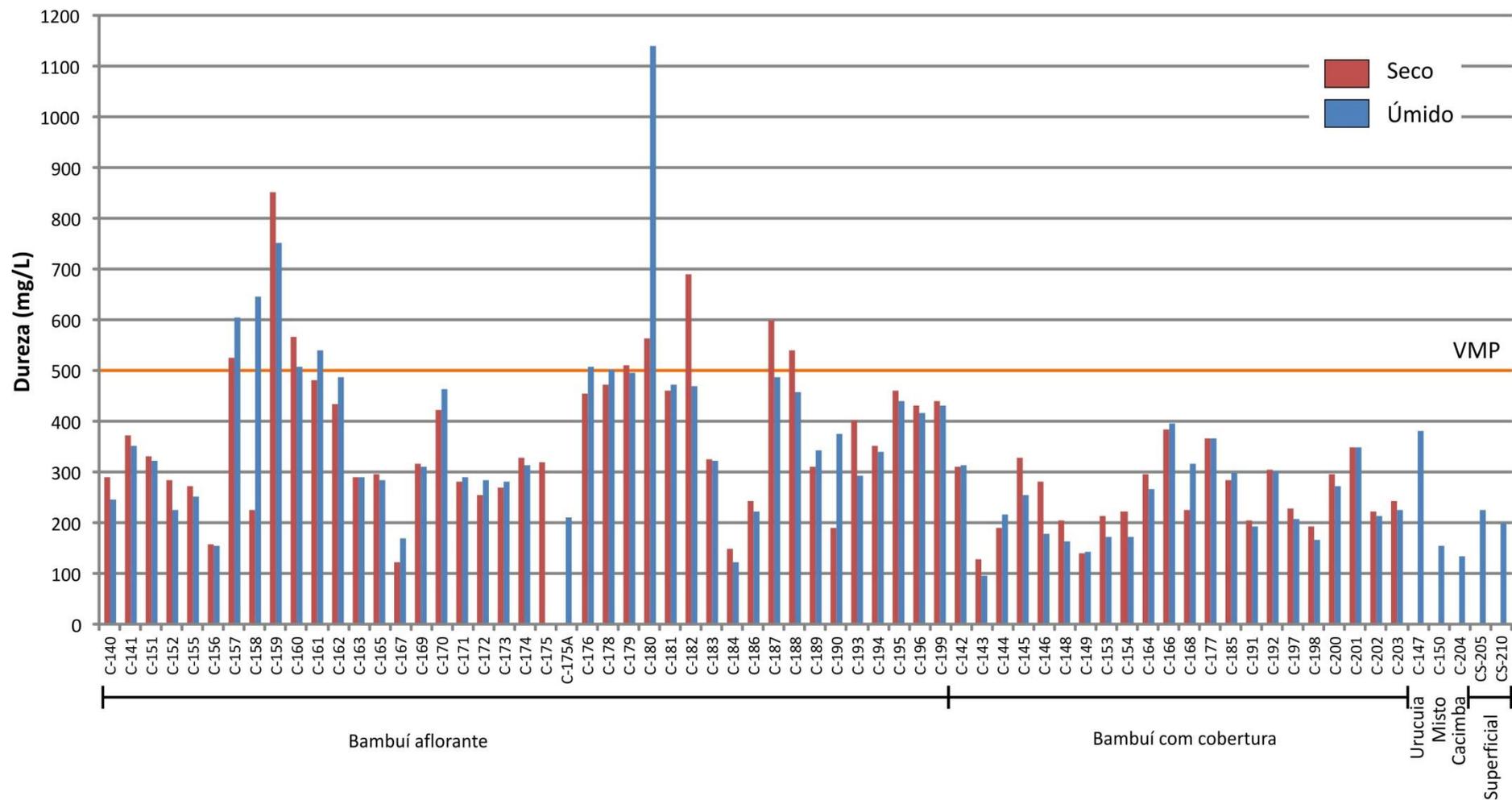


Figura 6.19 – Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

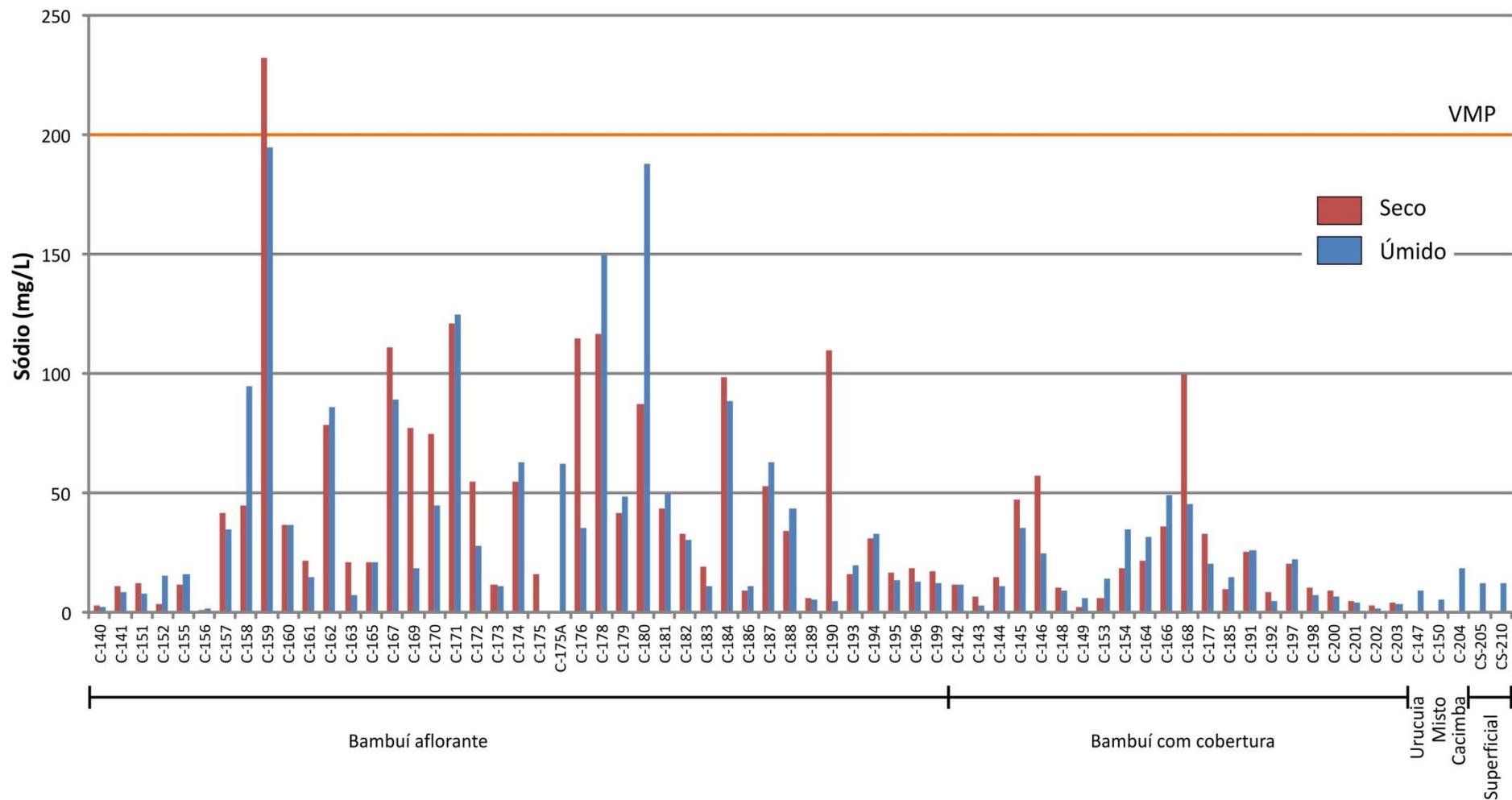


Figura 6.19 – Resultados analíticos para o parâmetro sódio e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

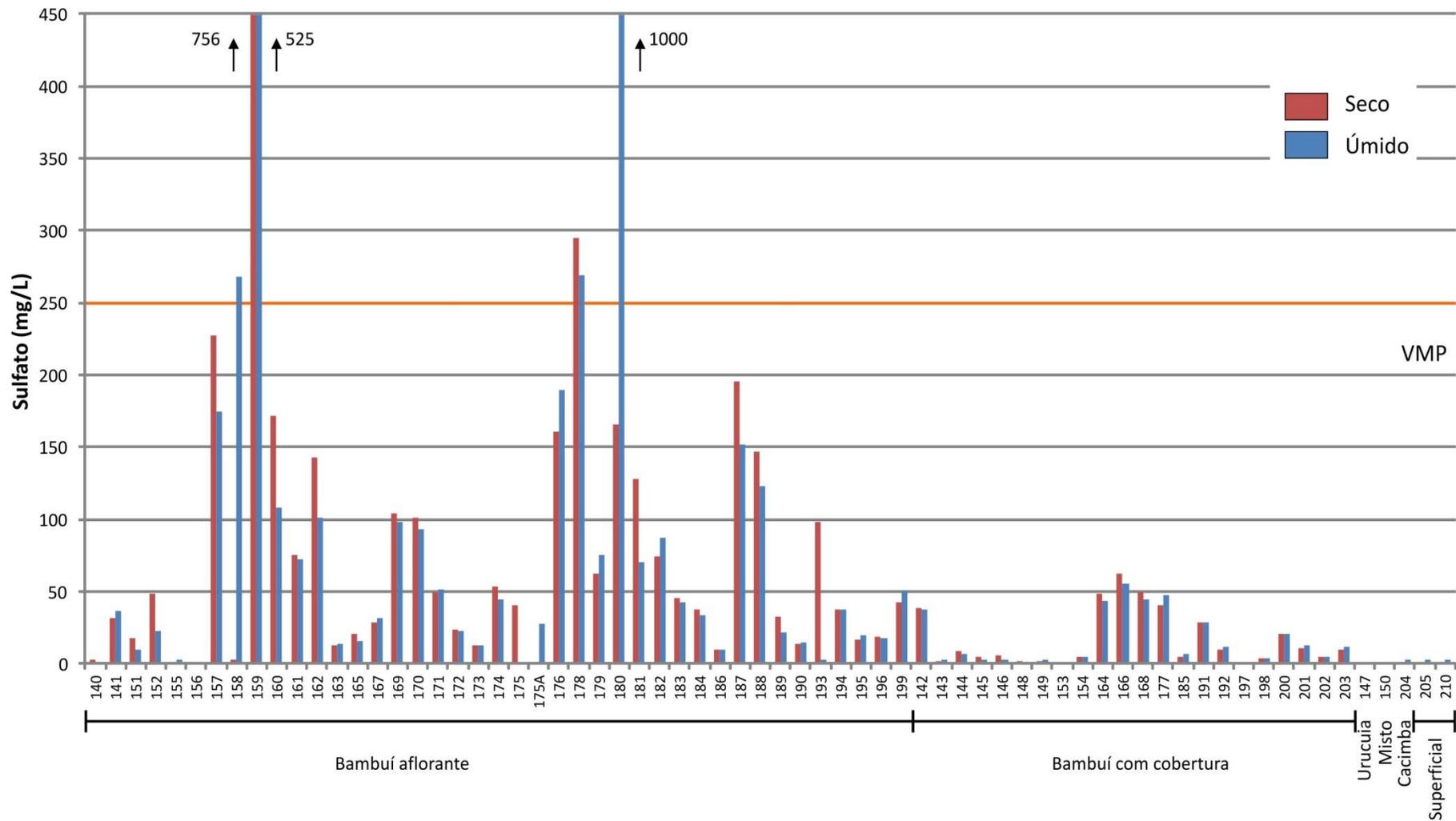


Figura 6.20 – Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

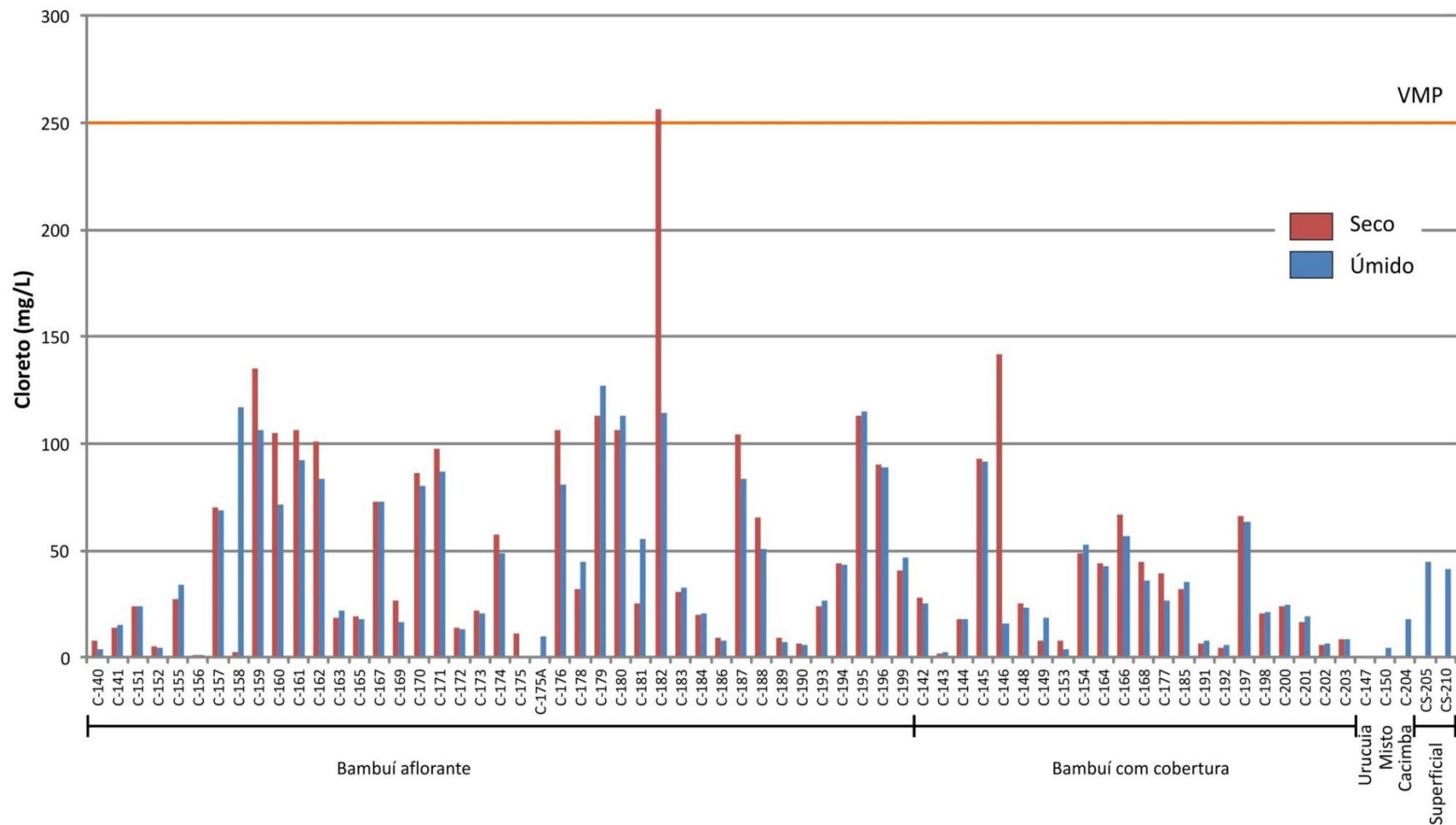


Figura 6.21 – Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

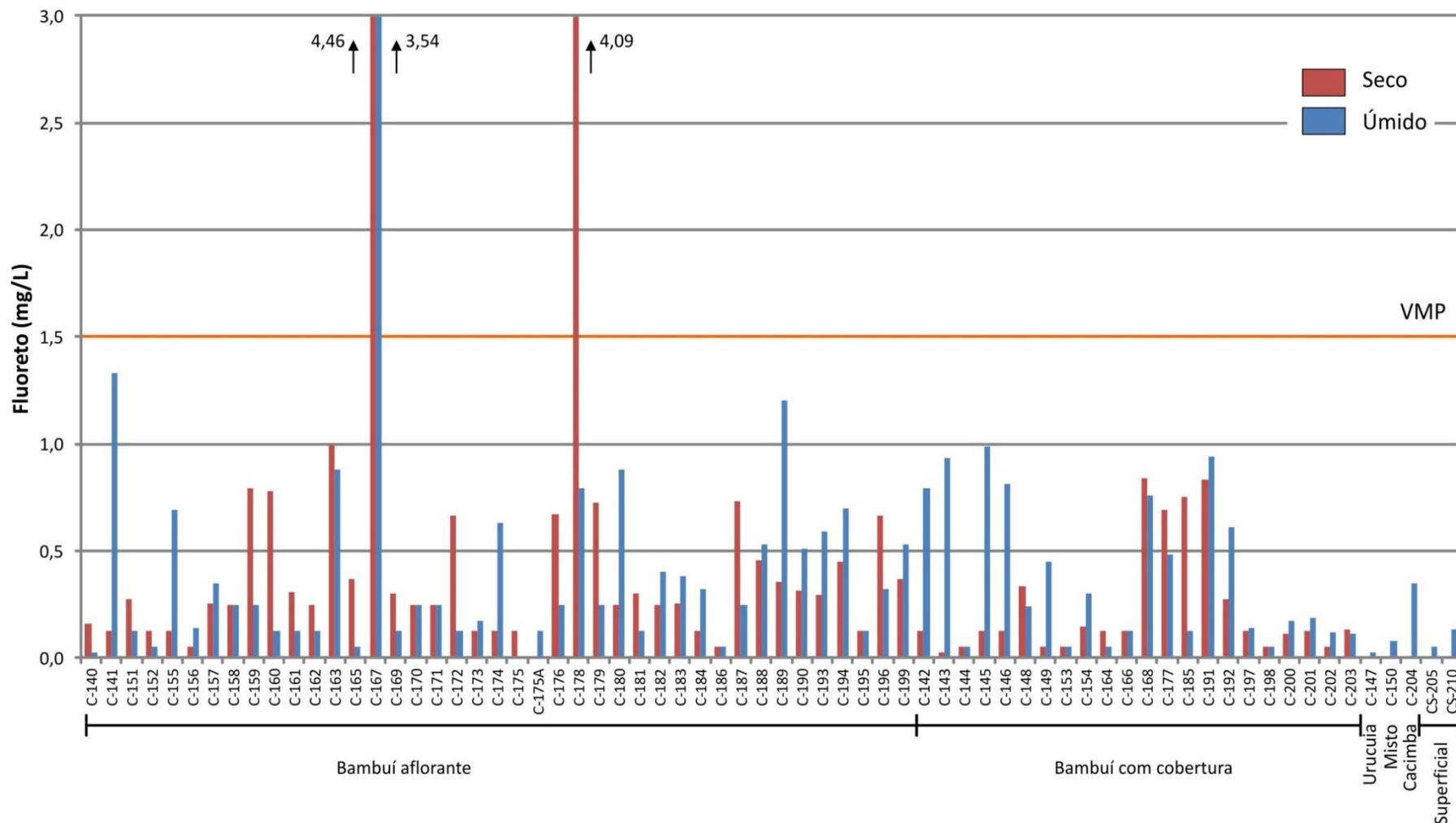


Figura 6.22 – Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

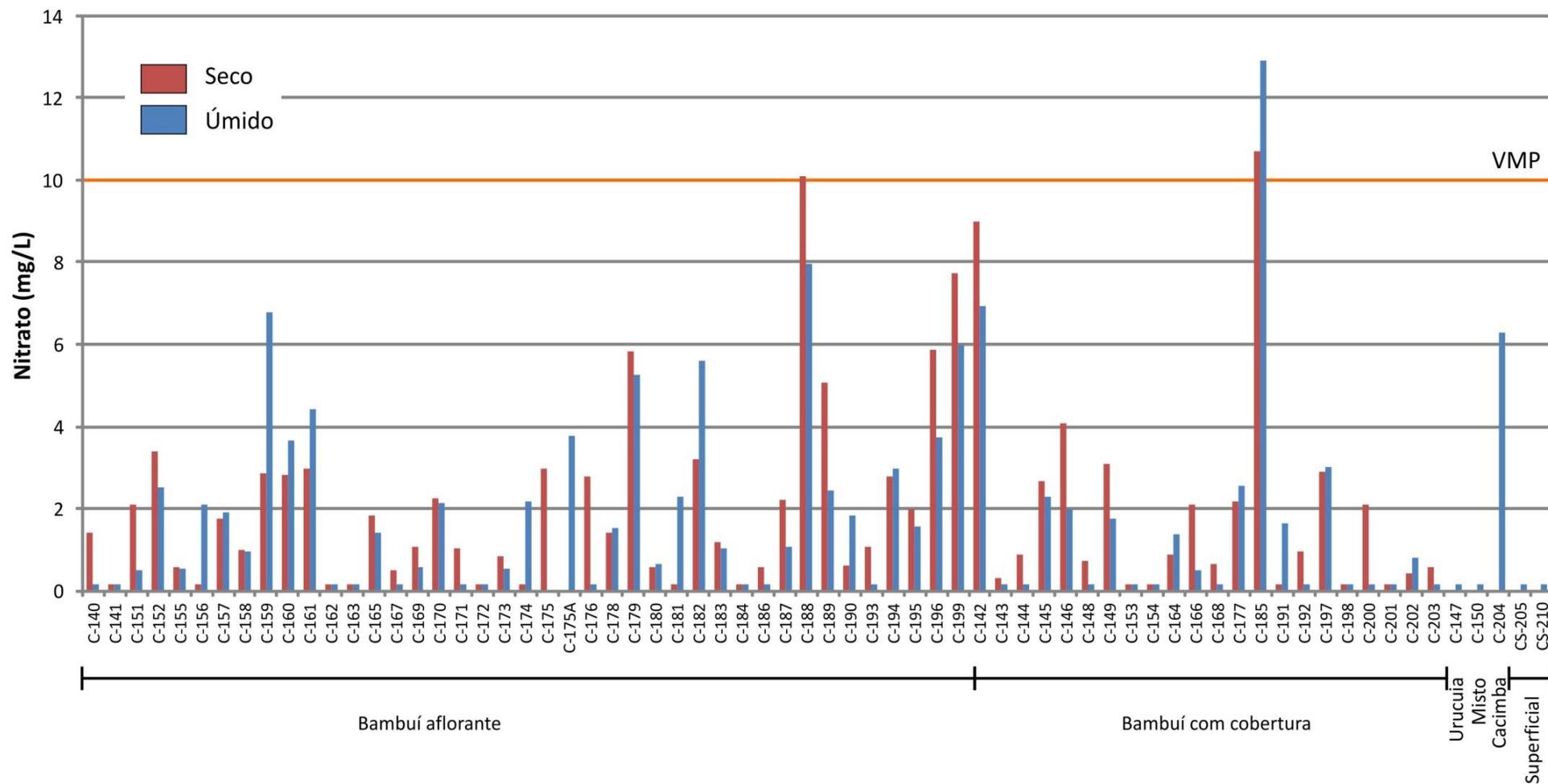


Figura 6.23 – Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

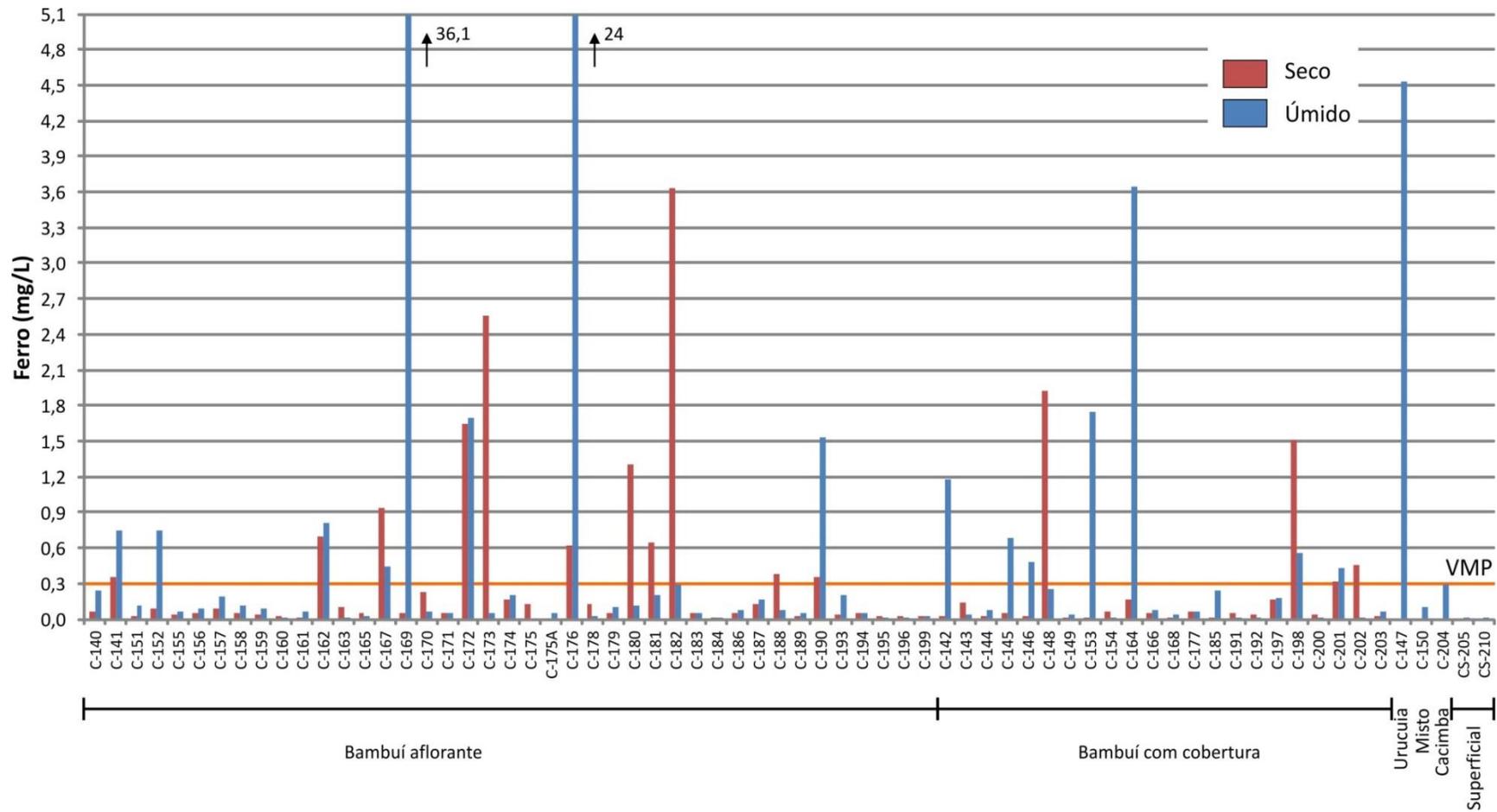


Figura 6.24 – Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

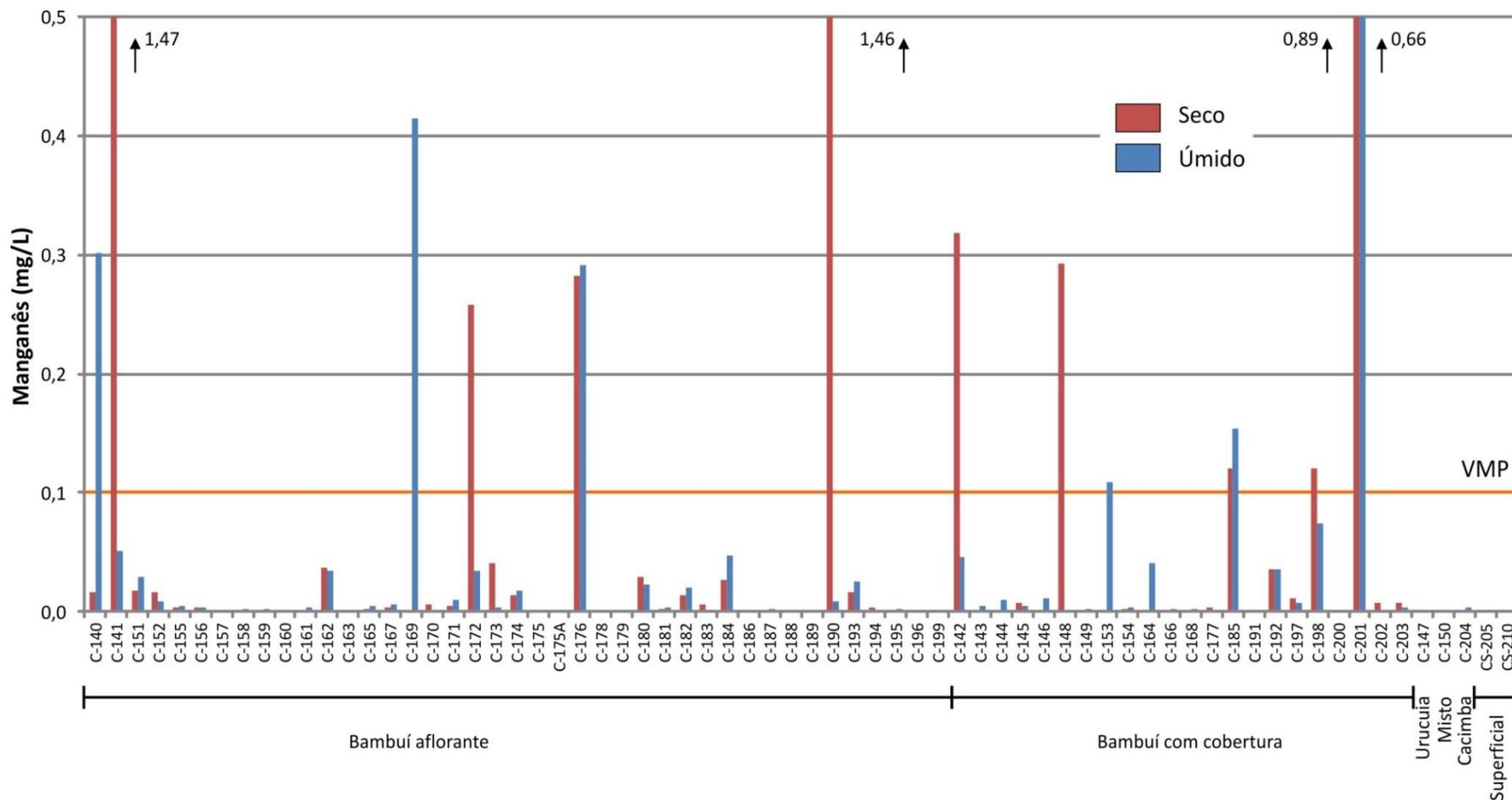


Figura 6.25 – Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras dos poços cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

6.6 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), conforme distribuição apresentada na Figura 4.3 e resultados apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – 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) ‰ | ‰ | |
| Bambuí aflorante | C-140 | -21,9 | | -3,58 | | 0,70783 |
| Bambuí aflorante | C-156 | -25,4 | | -4,09 | | 0,70782 |
| Bambuí aflorante | C-161 | -39,1 | | -5,86 | | 0,70781 |
| Bambuí aflorante | C-167 | -36,9 | | -5,59 | | 0,70997 |
| Bambuí aflorante | C-169 | -13,9 | | -1,92 | | 0,7086 |
| Bambuí aflorante | C-193 | -26,4 | | -3,98 | | 0,70866 |
| Bambuí aflorante | C-155 | -25,7 | | -4,37 | | 0,70826 |
| Bambuí aflorante | C-158 | -31,7 | | -4,91 | | 0,70871 |
| Bambuí aflorante | C-163 | -24,2 | | -4,06 | | 0,70823 |
| Bambuí aflorante | C-178 | -21,9 | | -3,57 | | 0,70887 |
| Bambuí aflorante | C-183 | -28,3 | | -4,33 | | 0,70799 |
| Bambuí recoberto | C-146 | -23,9 | | -3,79 | | 0,70816 |
| Bambuí recoberto | C-154 | -23,5 | | -3,89 | | 0,70798 |
| Bambuí recoberto | C-191 | -36,9 | | -5,59 | | 0,70997 |
| Bambuí recoberto | C-197 | -34,5 | | -4,54 | | 0,73082 |
| Bambuí 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 |
| Nacente do Rio João Rodrigues | CS-205 | -20,7 | | -3,07 | | 0,70807 |
| Rio Grande | CS-206 | -23,6 | | -3,71 | | 0,71288 |

6.6.1 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 6.26).

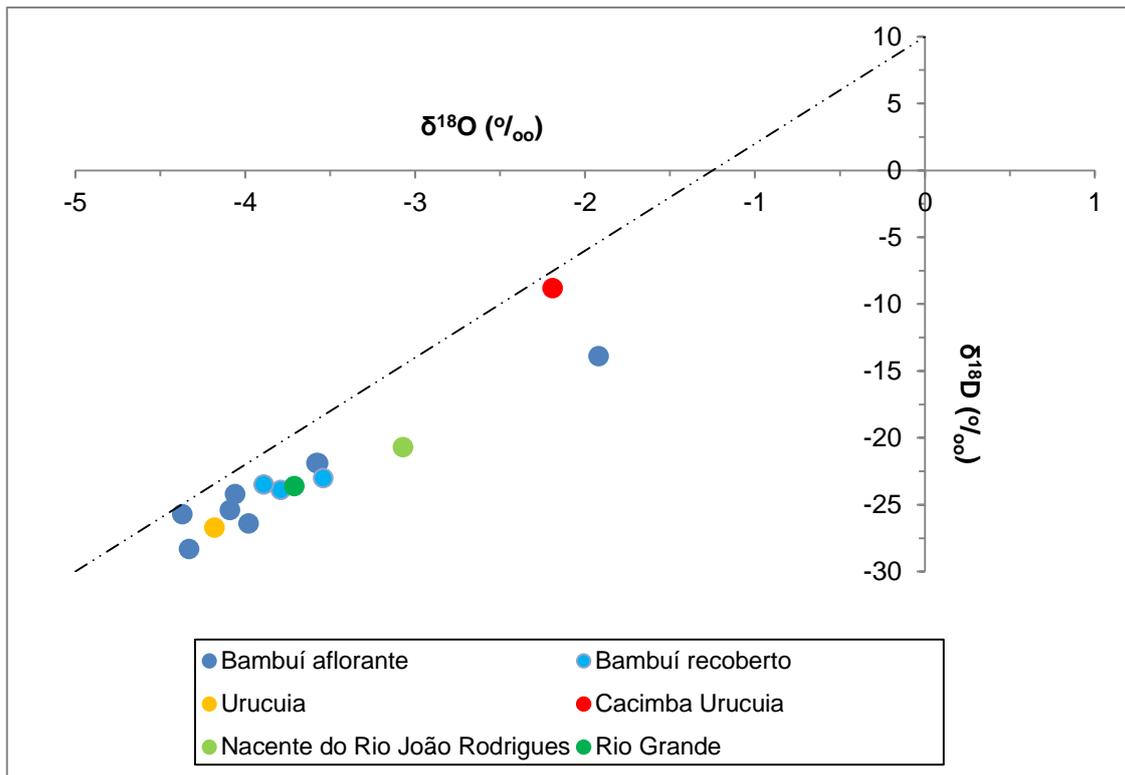


Figura 6.26 - Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para o conjunto total de dados e por compartimento hidrogeológico. RMM=Reta Meteorica Global.

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 6.26 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 ($-2,19\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ e $-8,8\text{‰}$ 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.

6.6.2 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.

6.7 Considerações finais

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 conseguinte, 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.

7. Hidrogeoquímica da Subárea Regional 3 - Montes Claros

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.

Na área piloto, o Grupo Bambuí está representado pela Formação Lagoa do Jacaré fácies superior (calcários puros, compactos e resistentes ao intemperismo) e inferior (calcários com intercalações de siltitos; descritos na literatura pela CPRM/COMIG, 2003). No nível regional não foi possível diferenciar seguramente as fácies devido, na sua maioria, à falta de clareza dos perfis litológicos dos poços.

Regionalmente, nota-se que, em determinadas áreas, o Grupo Bambuí pode apresentar expressiva cobertura arenítica (representada pelo Urucua 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 7.1 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).

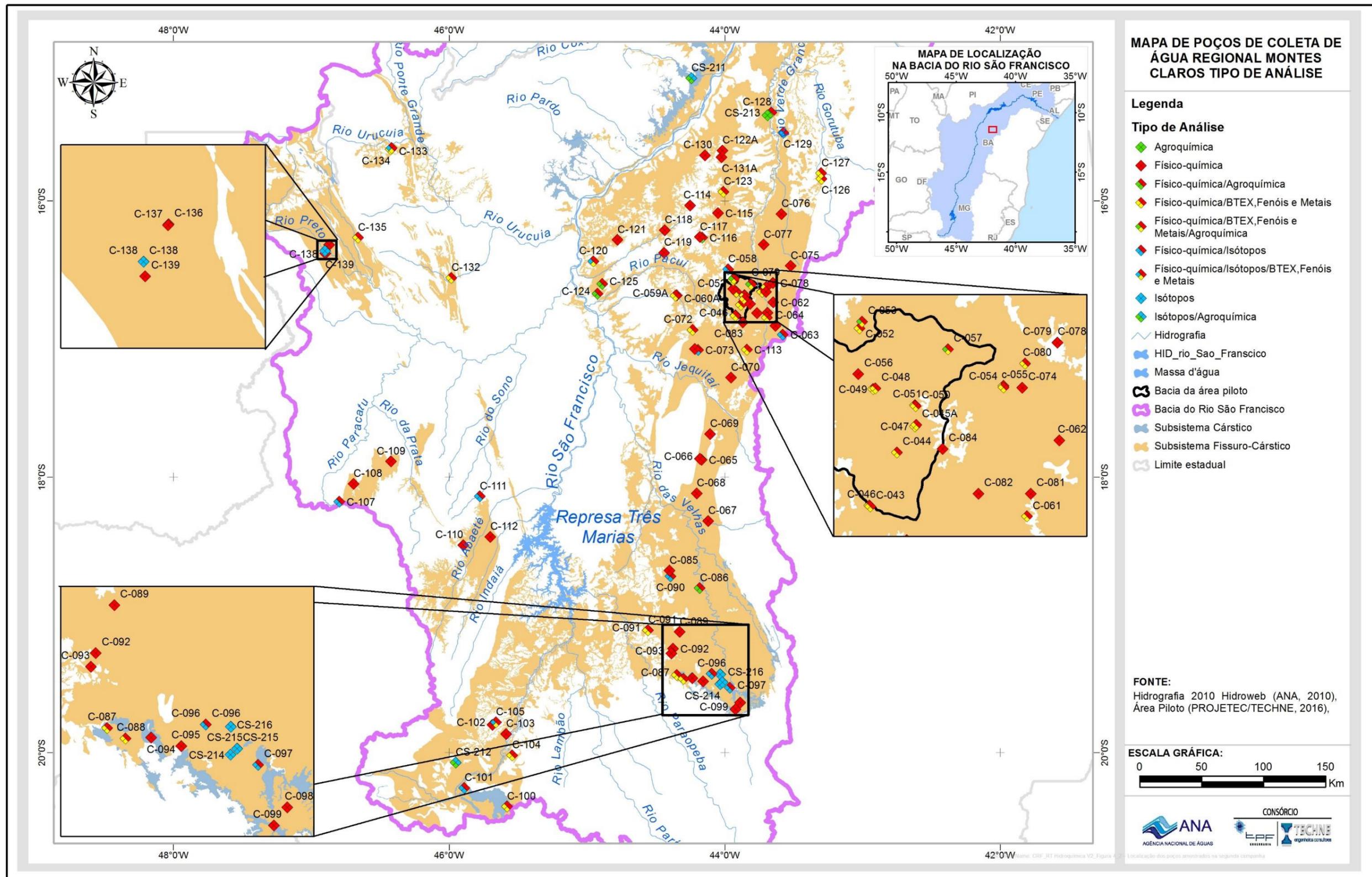


Figura 7.1 - Distribuição dos pontos de coleta de poços e águas superficiais na área regional de Montes Claros/MG.

7.1 Estatística Descritiva

As características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas possuem variações condicionadas por fatores diversos, como geológicos/hidrogeológicos e da sazonalidade climática. Tais fatores serão avaliados sob o ponto de vista da hidroquímica, num primeiro momento, mediante a análise dos dados estatísticos obtidos nas duas campanhas de amostragem, realizadas nos períodos seco e úmido. As Tabelas 7.1 e Figura 7.2 mostram os sumários estatísticos dos dois períodos de coletas.

Tabela 7.1 – 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 NH ₃) | 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=Coeficiente de Variação

Tabela 7.2 - 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 7.1 e Figura 7.1 e Figura 7.2).

A Figura 7.2 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 7.2 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 7.2 e Figura 7.2).

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 uma predominância 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 7.3 e Figura 7.8).

Os diagramas de dispersão (Figura 7.6 a Figura 7.8) 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 7.5 e Figura 7.6). Os diagramas STD e magnésio e o STD e sódio indicam, também, consistentes correlações positivas, mas mostram uma maior dispersão de alguns pontos (Figura 7.7 e Figura 7.8).

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) (Tabela 7.3).

**Tabela 7.3 - 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 |

O comportamento do CE, nas águas dos poços da área de Montes Claros, mostram valores relativamente similares no período seco (média 494,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$) em relação ao período úmido (média de 495,43 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Tabela 7.1 e Tabela 7.2).

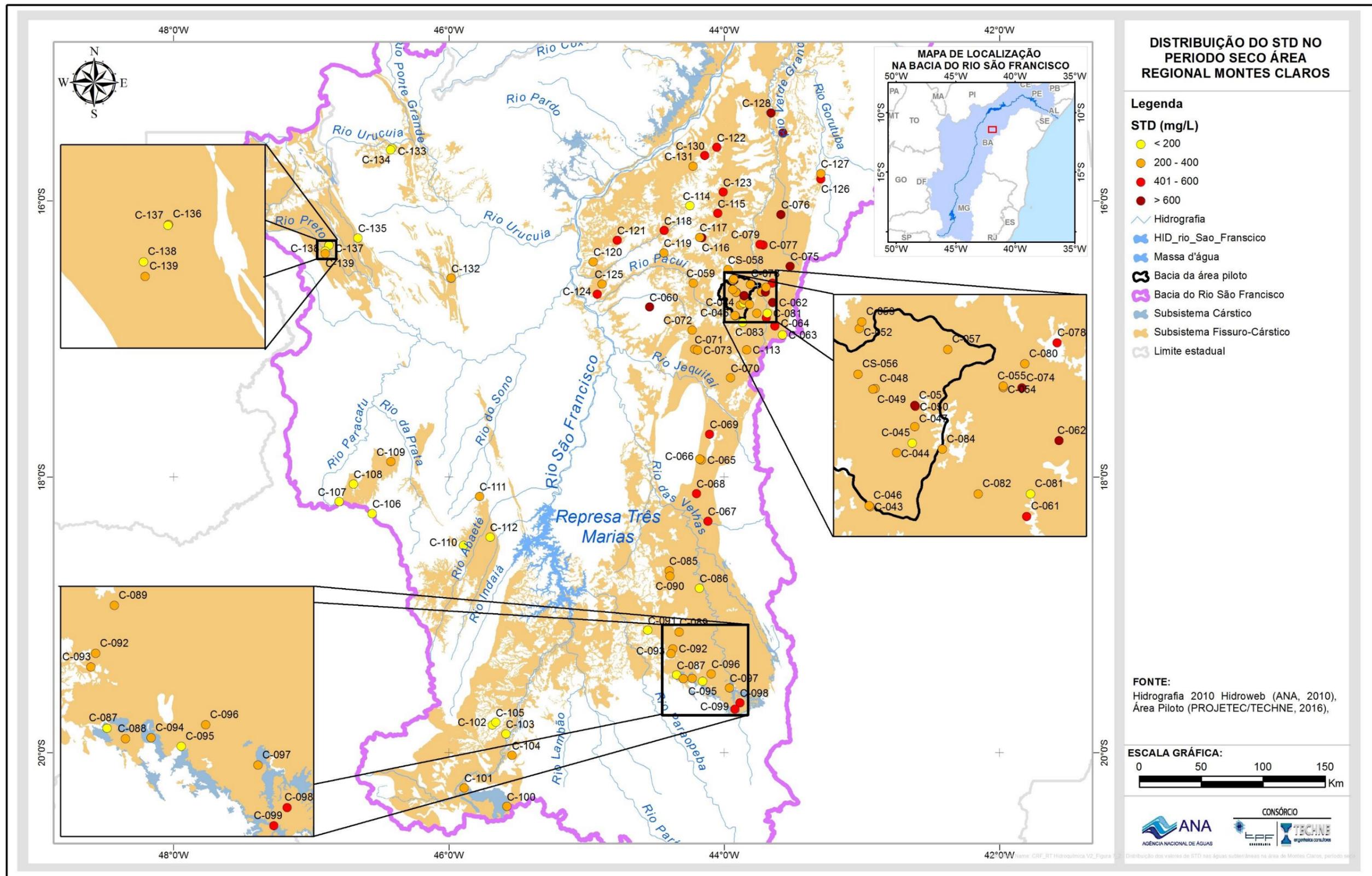


Figura 7.2 - Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

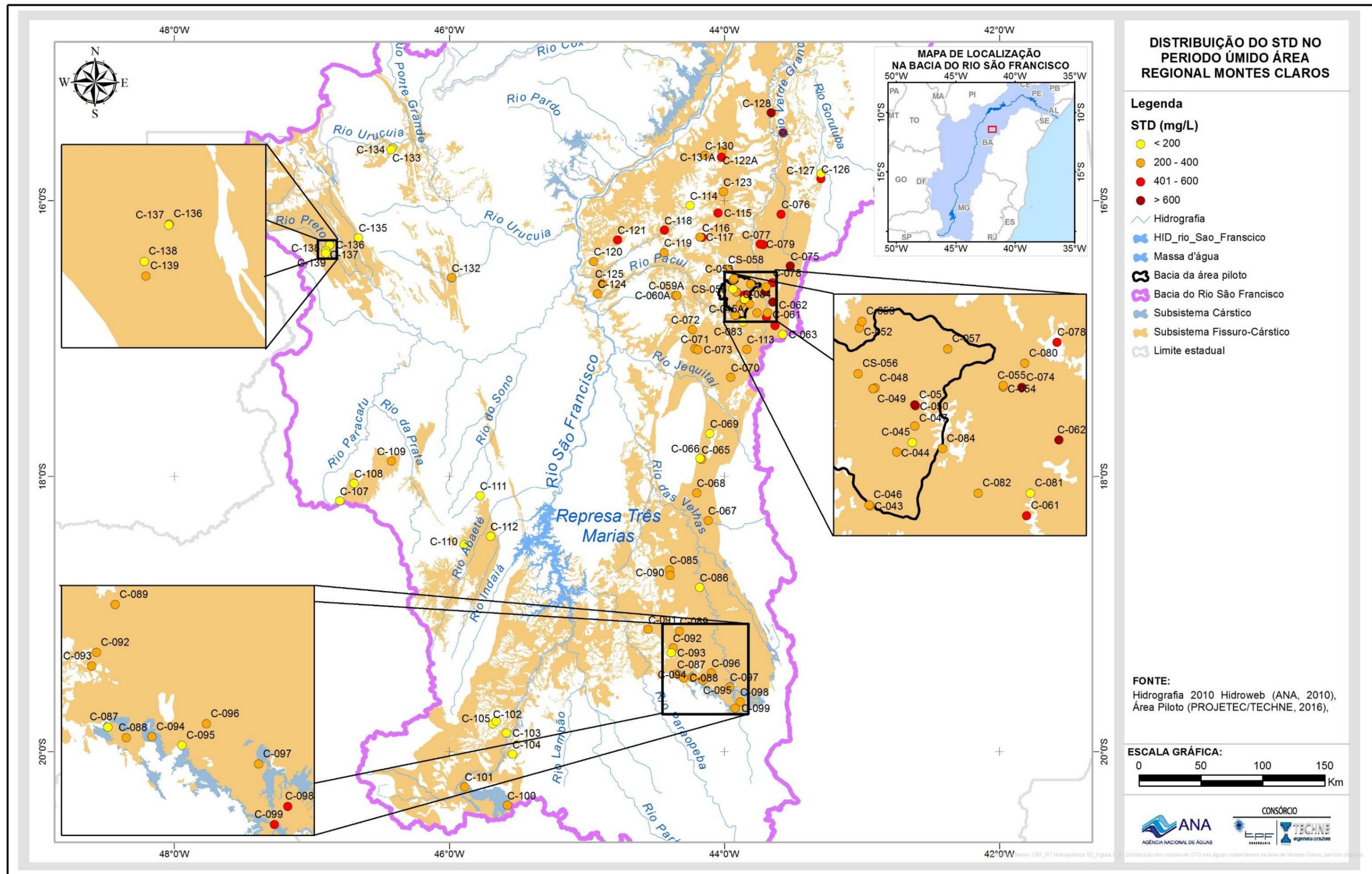


Figura 7.2 - Distribuição dos valores de STD nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período chuvoso.

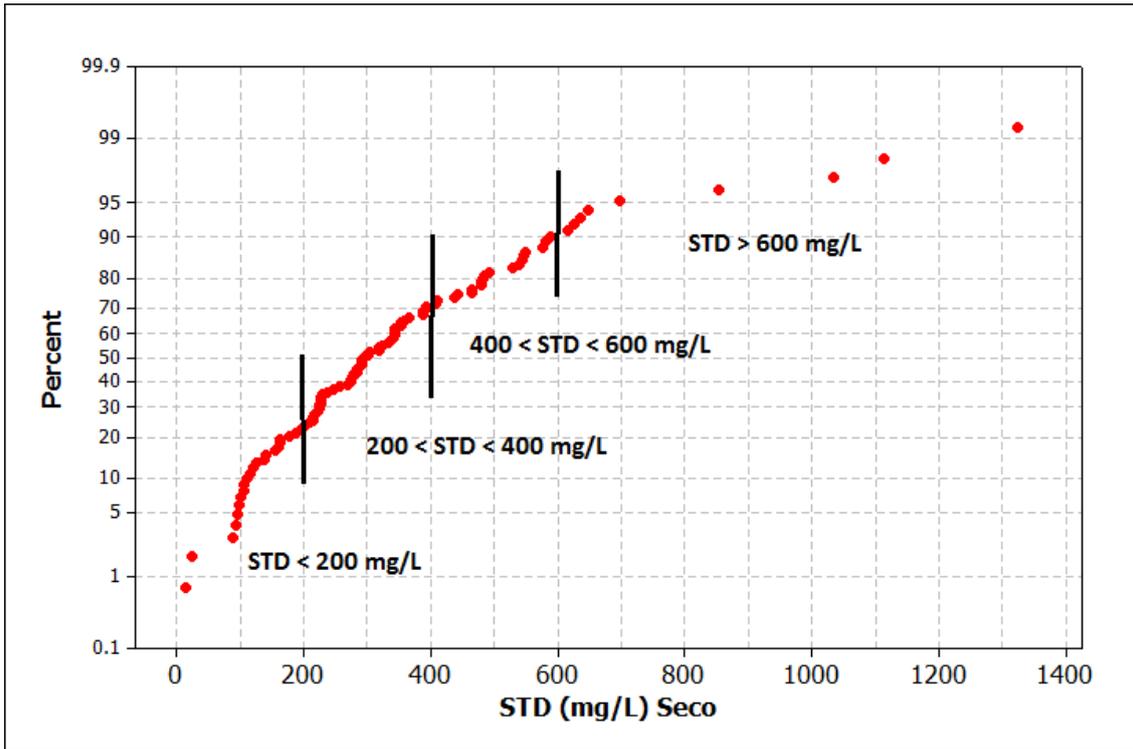


Figura 7.3 - Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período seco.

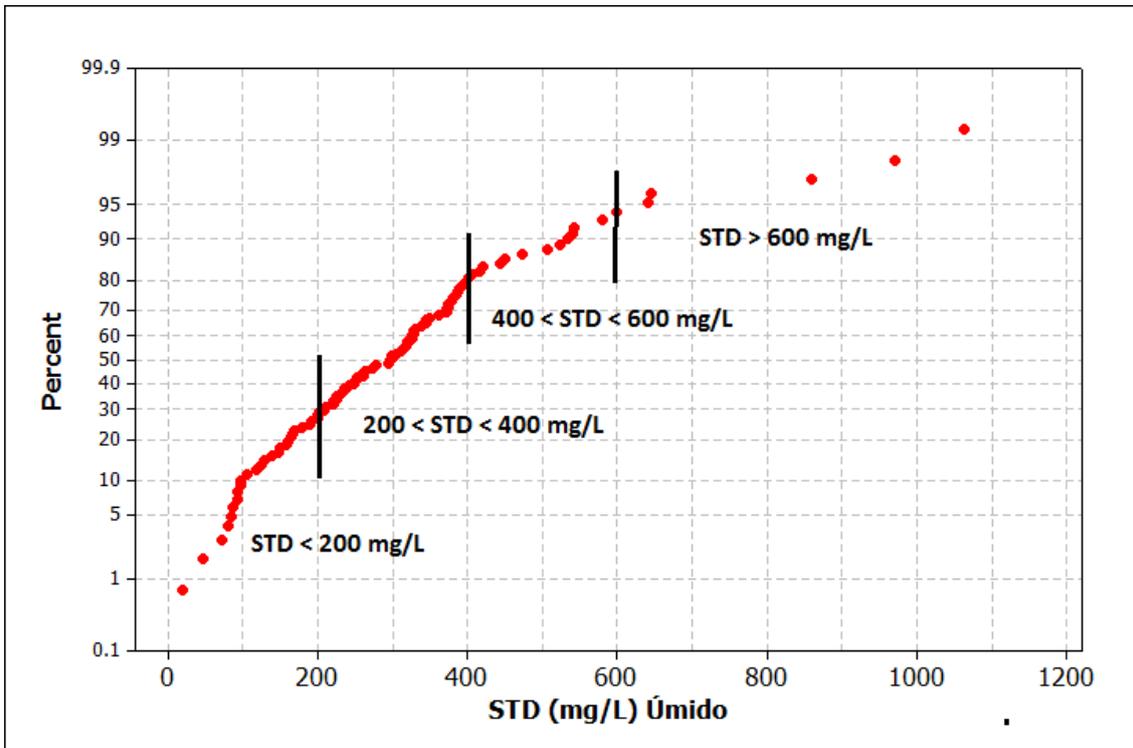


Figura 7.4 - Distribuição de STD por frequência acumulada na área de Montes Claros no período úmido.

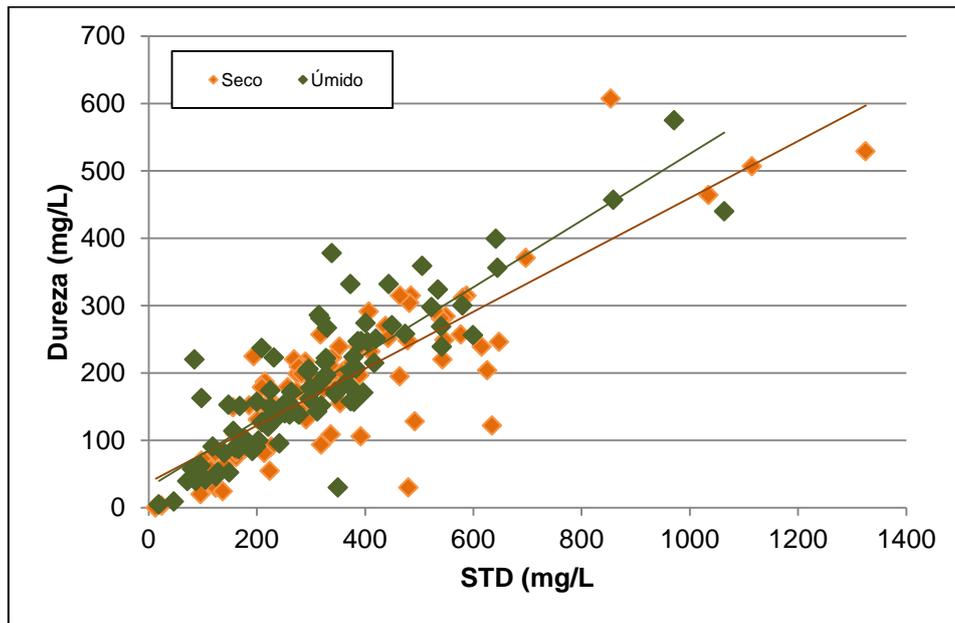


Figura 7.5 - Correlação entre STD e dureza em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

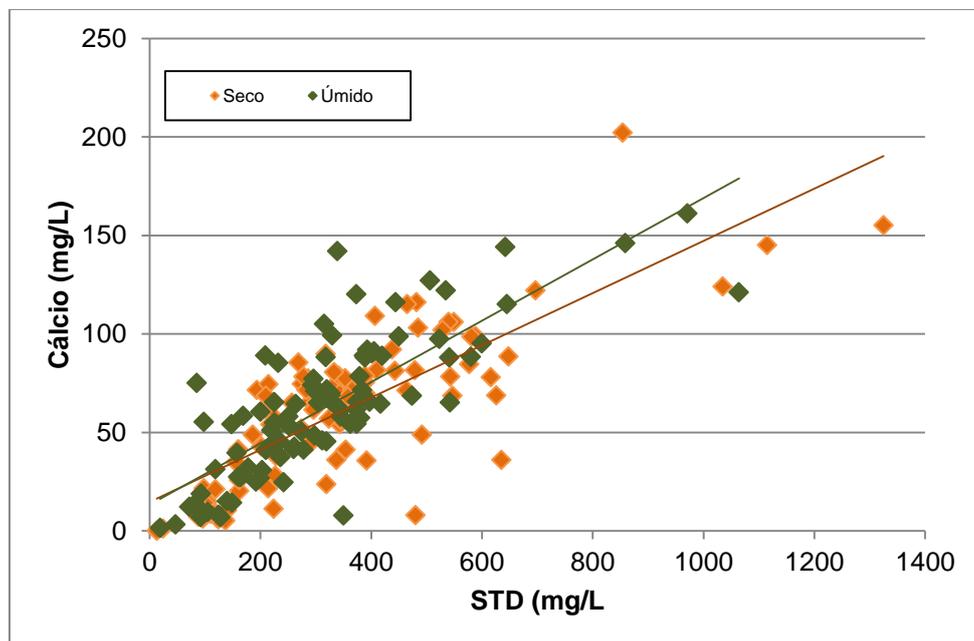


Figura 7.6 - Correlação entre STD e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

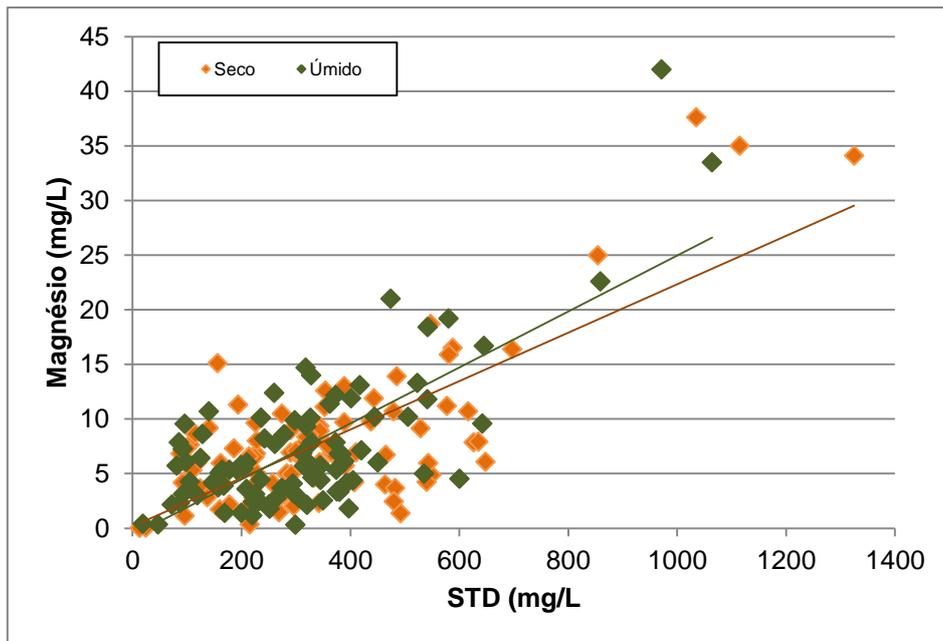


Figura 7.7 - Correlação entre STD e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

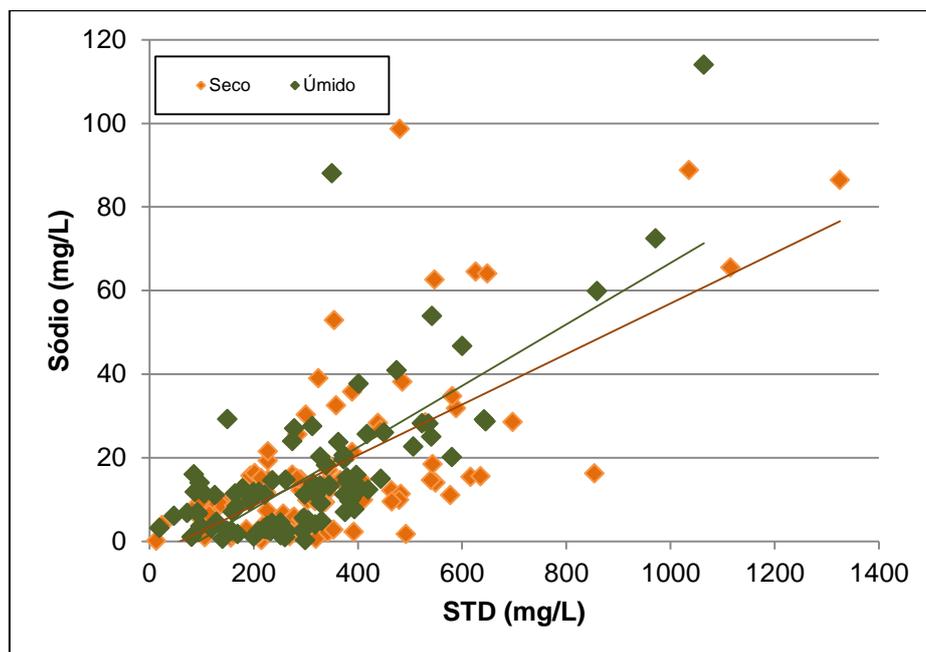


Figura 7.8 - Correlação entre STD e sódio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

Os valores de temperatura nas amostras de água da área, no período seco, variaram de 19,20 (C-043) a 29,00 °C (C-094), média de 25,57 °C, enquanto no período úmido variaram de 20,30 (C-049) a 28,10 (C-126), com média de 24,90 °C (Tabela 7.1 e Tabela 7.2, respectivamente). Observa-se que no período seco as temperaturas das amostras foram levemente superiores às do período úmido. Ressalta-se que a temperatura medida em campo não representa o

valor real da água do aquífero, mas equivale à temperatura da água no interior do poço. Dessa forma, acredita-se que a variação de temperatura aqui evidenciada não influencia no comportamento do CO₂ dissolvido nessas águas e nem reflete no teor de cálcio, já que para acontecer escape de CO₂ e precipitação de CaCO₃ seria necessário um aumento mais forte da temperatura da água do aquífero.

A Tabela 7.1 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 7.2) 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. Essas observações se refletem na baixa amplitude dos valores de pH (pequenas variações obtidas entre os valores máximos e mínimos), tornando menores os valores de desvio padrão. O comportamento dessa distribuição também pode ser evidenciado nos coeficientes de variação, que são baixos, refletindo uma dispersão de valores relativamente pequena.

Com relação aos íons maiores, entre os cátions, o cálcio se destaca nas amostras analisadas. No período seco (Tabela 7.1) esse parâmetro variou de 0,08 (C-106) a 202,00 mg/L (C-060), com média de 60,61 mg/L e amplitude de 201,92 mg/L. No período úmido o cálcio variou de 1,38 (C-134) a 161,00 mg/L (C-062), refletindo uma média de 61,77 mg/L e amplitude de 159,62 mg/L (Tabela 7.2). Nota-se que no período seco ocorreram maiores variações entre os teores máximos e mínimos, inclusive com alguns poços apresentando teores significativamente baixos de cálcio para um ambiente cárstico (como os poços C-045, C-083, C-086, C-102, C-103, C-105, 106, C-107, C-108, C-110, C-112, C-124, C-127, C-133, C-134, C-136, C-137, C-138 e C-139).

Os mapas de distribuição do cálcio, para os dois períodos sazonais, (Figura 7.9 e Figura 7.10) seguem a mesma tendência da distribuição já observada para o STD, isto é, com valores superiores concentrados nas bordas nordeste e centro-leste da área. Esse cenário provavelmente reflete o processo de solubilização das rochas carbonáticas presente de forma significativa na região. Por outro lado, as porções identificadas na área, com os menores teores de cálcio coincidem com os menores valores STD, e estão situadas principalmente, na faixa oeste. Possivelmente essas águas apresentam contribuições das coberturas areníticas, que possuem menores valores de cálcio.

É importante destacar também que parte da mineralização dessas águas subterrâneas advém do cálcio, conforme evidenciado pelo gráfico de correlação apresentado na Figura 7.6; corroborando com a semelhança no padrão de distribuição espacial entre ambos os parâmetros na área de estudo.

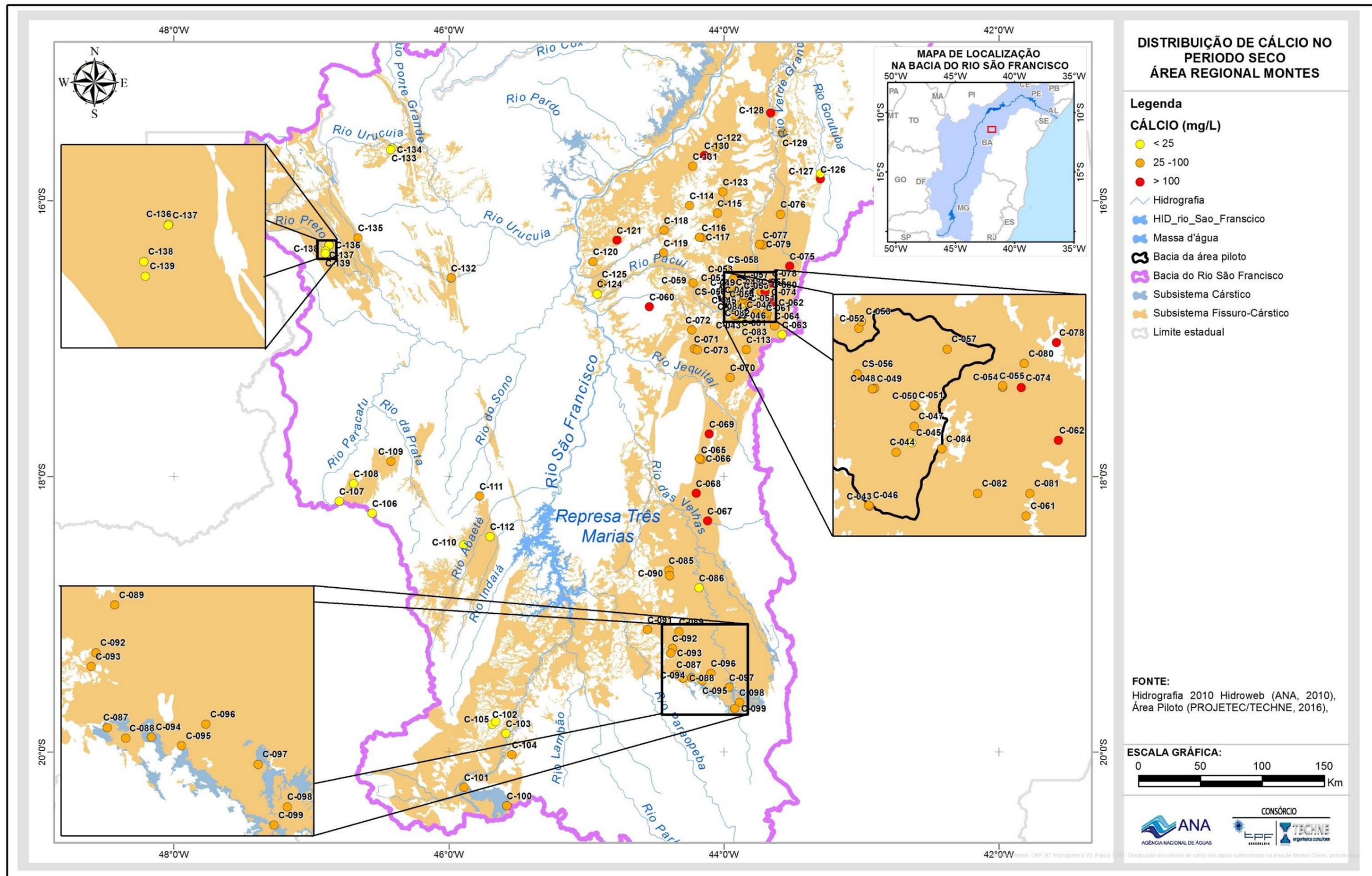


Figura 7.9 - Distribuição dos valores de cálcio nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

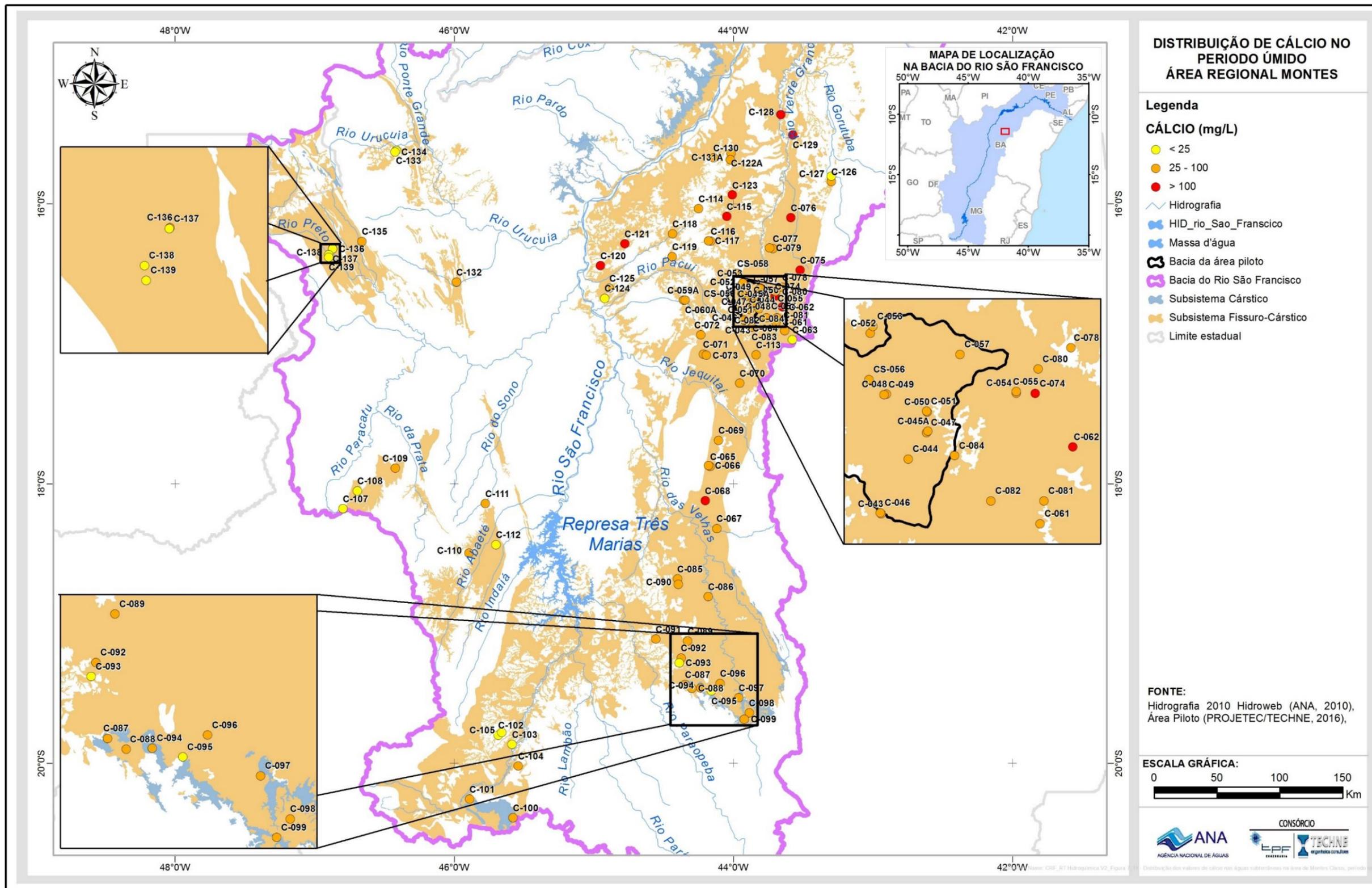


Figura 7.10 - Distribuição dos valores de cálcio nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

O magnésio ocorre nessas águas em teores menores que os de cálcio. No período seco os teores obtidos variaram de 0,02 (C-106) a 37,60 mg/L (C-075), com média de 7,85 mg/L (Tabela 7.1). Enquanto que no período úmido ocorreram variações de 0,33 (C-096) a 42,00 mg/L (C-062), com média de 7,31 mg/L (Tabela 7.2). É importante destacar que em ambos os períodos de amostragem é comum a presença de amostras de água com teores abaixo de 10 mg/L, mostrando certamente o processo de troca catiônica entre o cálcio e magnésio ou influencia significativa das rochas areníticas da cobertura no quimismo dessas águas.

Os demais cátions sódio e potássio ocorrem em teores discretos, nos dois períodos de coleta, com poucas amostras de sódio com teores acima de 40 mg/L (C-51, C-62, C-75, C-77, C-116, C-124 e C-128), localizadas principalmente na parte norte-nordeste da área. O sódio apresentou no período seco valores variáveis de 0,11 (C-106) a 98,60 mg/L (C-124), com média de 17,42 mg/L; e no período úmido as variações ocorreram no intervalo de 0,23 (C-096) a 114,00 mg/L (C-128), com média de 15,97 mg/L (Tabelas 7.1 e 7.2). É importante resaltar que as amostras com teores relativamente elevados de sódio (C-51, C-62, C-75, C-77, C-116, C-124, C-128) apresentaram oscilações significativas nos valores medidos entre as campanhas de amostragem. Esse cenário está possivelmente ligado à recarga ou processos como troca catiônica e contaminação antrópica pontual.

As variações de potássio no período seco foram de 0,07 (C-106) a 8,11 mg/L (C-129), com média 1,71 mg/L, e no período úmido os valores variaram de 0,14 (C-096) a 9,09 mg/L (C-129), com média de 1,84 mg/L (Tabelas 7.1 e 7.20).

As amostras de águas, nos dois períodos, mostram um predomínio do bicarbonato em relação ao carbonato. O domínio do bicarbonato está relacionado à variação dos valores de pH, que nas águas dos poços amostrados apresentaram em geral uma variação de 6,4 a 8,2, dentro do campo de predomínio do bicarbonato, conforme discutido em Freeze & Cherry (1979). No período seco, observou-se apenas uma amostra com pH acima de 8,2 (C-124) e que mostrou teor de carbonato da ordem de 8,54 mg/L.

No período úmido, por outro lado, sete poços apresentaram concentrações de carbonatos, os quais o C-087 (5,20 mg/L), C-88 (7,76 mg/L), C-089 (14,6 mg/L), C-092 (9,68 mg/L), C-093 (8,88 mg/L), C-098 (2,5 mg/L) e C-125 (13,5 mg/L). A leitura dos valores de pH medidos em campo ficou entre 7,18 e 7,85, portanto, não correspondentes ao intervalo de domínio de ocorrência do carbonato, de acordo Freeze & Cherry (1979) que analisaram as relações existentes entre a variação das concentrações de carbonato e bicarbonato e os valores de pH obtidos. Diante disso, acredita-se que podem ter havido problemas na leitura da sonda de pHmetro no momento da medida.

Nesse contexto, o bicarbonato é o principal ânion presente nas amostras de águas e, em conjunto com o cálcio, é o responsável pelo enriquecimento iônico (que se reflete nos teores de STD) dessas águas, conforme Figura 7.11.

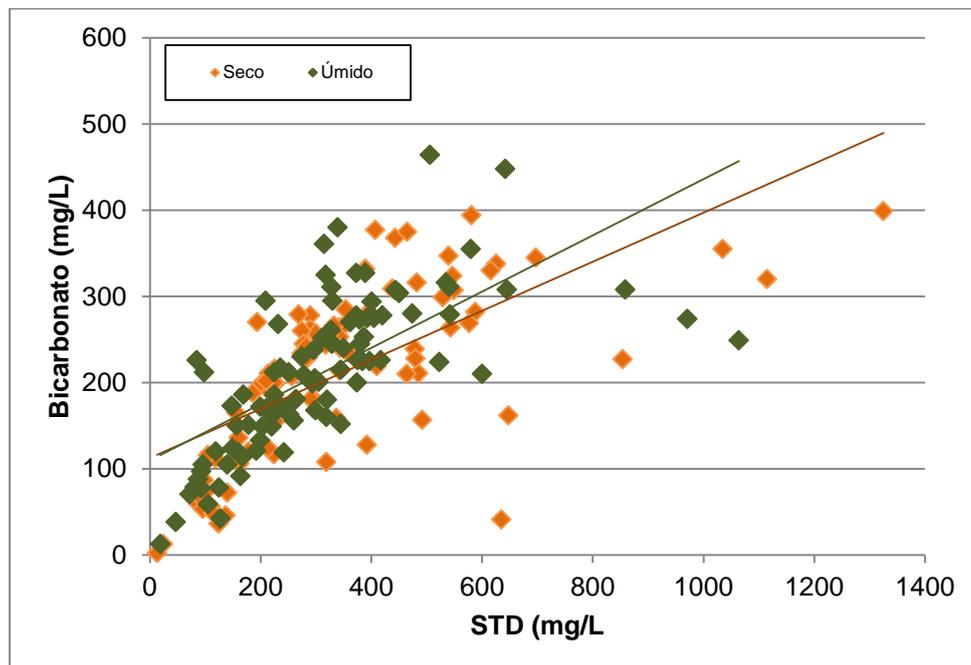


Figura 7.11 - Correlação entre STD e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

No período seco, os resultados de bicarbonato variaram de 2,50 (C-106) a 399,00 mg/L (C-128), com média de 211,02 mg/L; e de 12,70 (C-134) a 464,00 mg/L (C-115), com média de 211,11 mg/L, no período úmido (Tabela 7.1 e Figura 7.2). Comparando a distribuição dos teores de bicarbonatos nos dois períodos sazonais, representados nas Figura 7.12 e Figura 7.13, fica evidenciado que as variações dos teores não foram significativas. Nas referidas figuras observa-se que os maiores teores de bicarbonato ocorrem na parte nordeste e centro-leste da área e os menores teores estão localizados nas porções oeste e sul. Essa distribuição mostra, portanto, que a porção nordeste é mais carbonática em detrimento das demais.

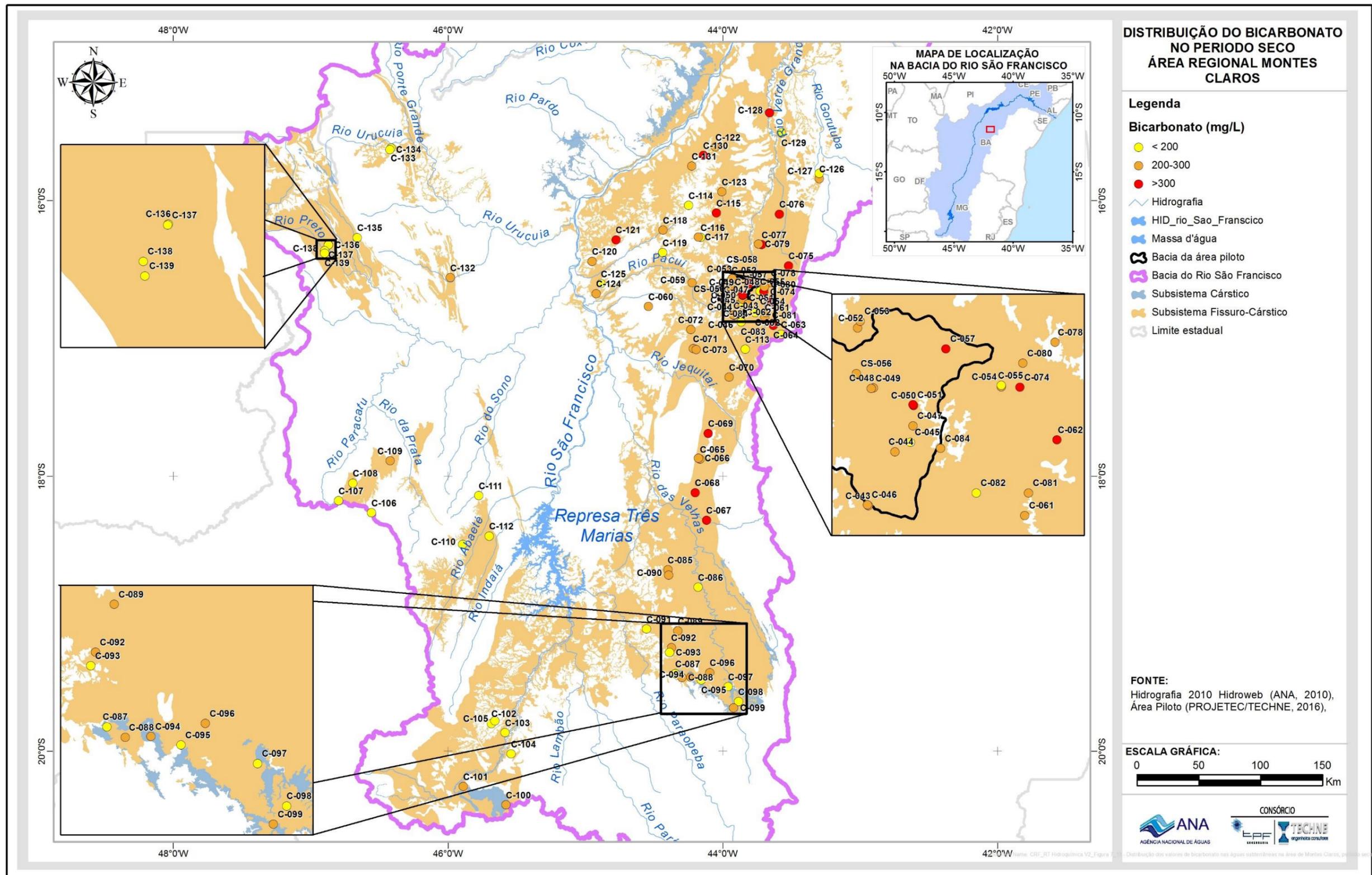


Figura 7.12 - Distribuição dos valores de bicarbonato nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

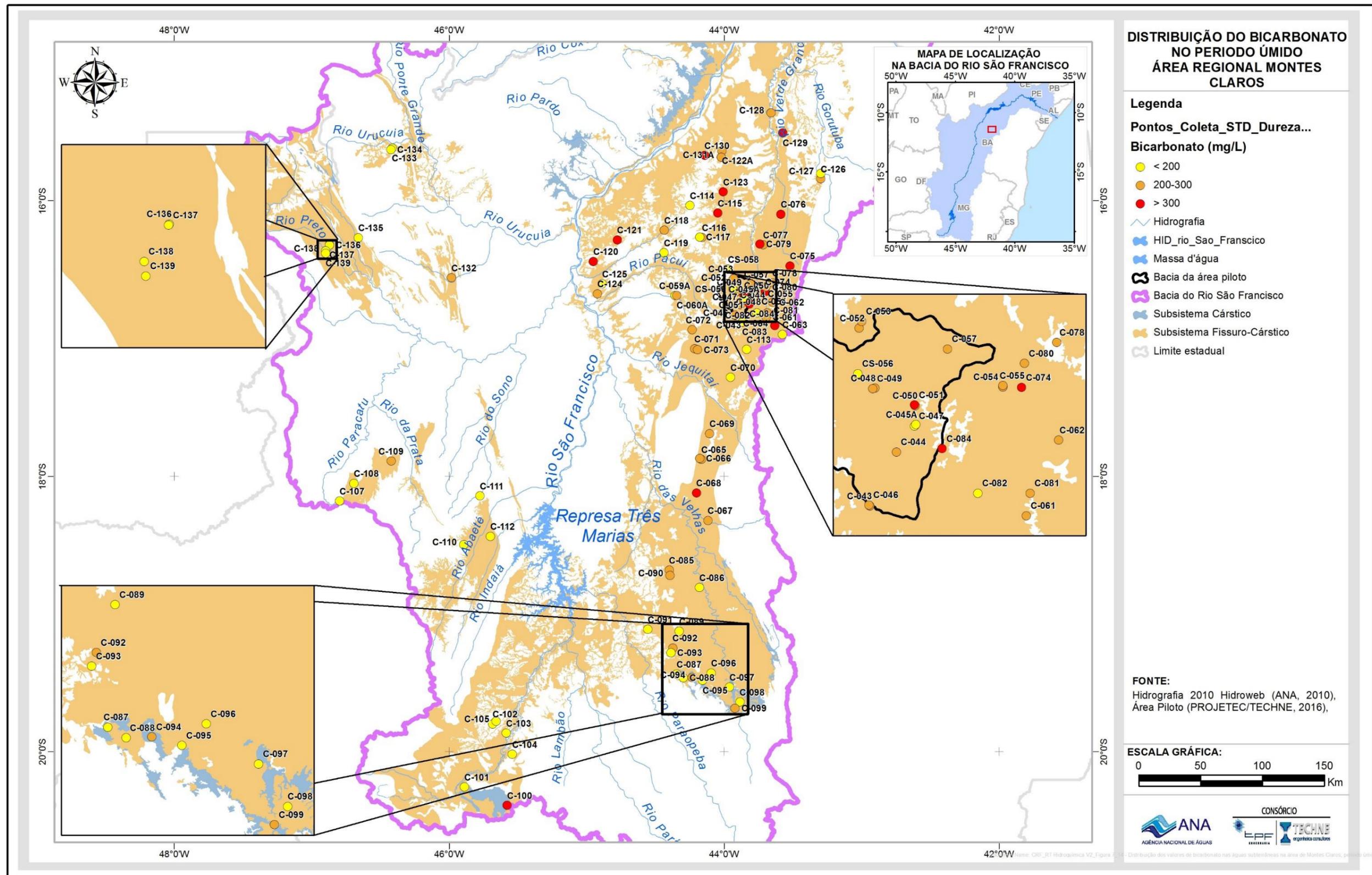


Figura 7.13 - Distribuição dos valores de bicarbonato nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido.

Os teores de sulfato obtidos nas águas subterrâneas da área se encontram, em grande parte das amostras em teores baixos, mas apresentando grande amplitude entre os valores extremos. No período seco o sulfato variou de 0,25 (C-103, C-106, C-110, C-134, C-138) a 463 mg/L (C-060), com média 23, 27 mg/L e amplitude de 462,75 mg/L (Tabela 7.1). No período úmido, os valores variaram de 0,25 (C-063, C-102, C-103, C-107, C-108, C-112, C-139) a 453 mg/L (C-062), com média de 19,75 mg/L e amplitude de 452,75 mg/L (Tabela 7.2). Localmente alguns poços apresentaram teores acima 100 mg/L para sulfato (C-060, C-061, C-062, C-074, C-075 e C-078), inclusive com o poço C-060, no município Coração de Jesus, chegando a 463 mg/L no período seco.

Ressalta-se que geralmente os teores mais altos de sulfato estão posicionados na parte leste da área piloto de Montes Claros, estando, algumas vezes, acompanhados por Eh (potencial de oxidação/redução) negativos, podendo estar relacionados, provavelmente, à oxidação de sulfetos presentes nas fácies da Formação Lagoa do Jacaré. A Figura 7.14 mostra que os resultados maiores de sulfato indicam uma consistente correlação com o cálcio, reforçando, portanto, a hipótese de que os teores elevados do sulfato estão relacionados, principalmente, a fontes geogênicas.

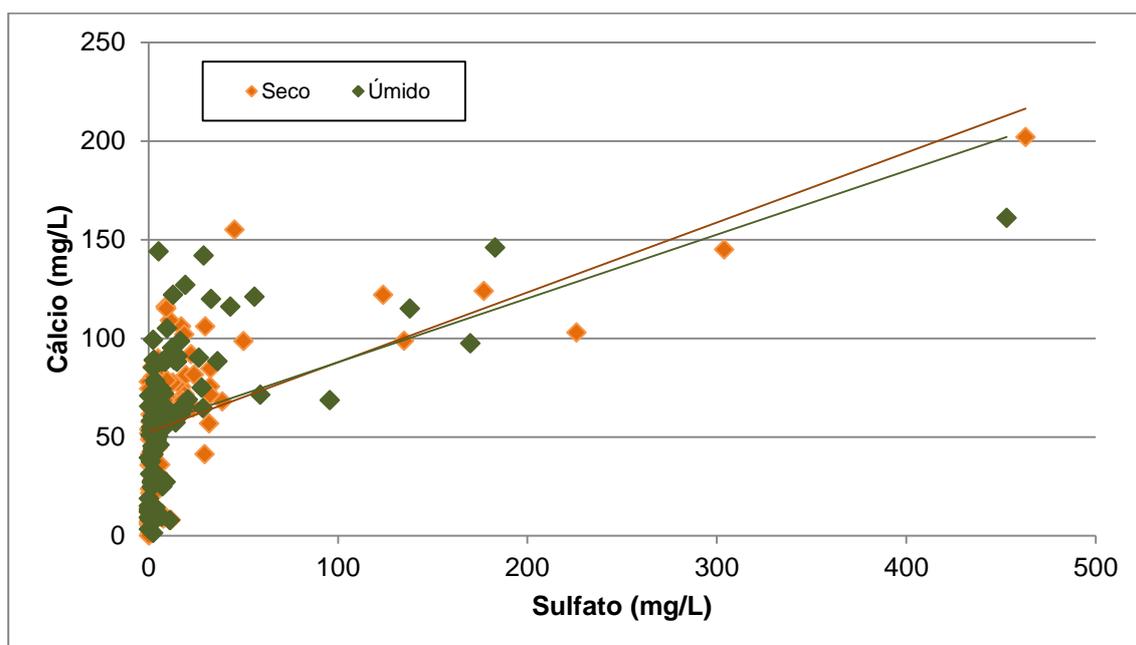


Figura 7.14 - Correlação entre cálcio e sulfato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

Os resultados de cloreto nas águas subterrâneas na área de estudo, a exemplo dos resultados do sulfato, não apresentaram variações expressivas entre os períodos sazonais. No período seco os teores de cloreto variaram de 0,25 (C-076, C-083, C-086, C-091, C-098, C-105, C-106, C-108, C-112, C-114, C-134, C-135, C-137 e C-139) a 243 mg/L (C-128), com média de 13,95 mg/L (Tabela 7.1). No período de úmido, os valores variaram de 0,25 mg/L (C-083, C-089, C-103, C-108, C-110, C-112, C-137 e C-139) a 287 mg/L (C-128), com média de 14,74 mg/L (Tabelas 7.2). Nota-se que, no geral, as águas subterrâneas da região de Montes Claros possuem concentrações baixas para o cloreto.

O incremento do íon cloreto nas águas subterrâneas ocorre, principalmente, na parte norte-nordeste da área, inclusive com destaque para o poço (C-128), no município de Jaíba, que alcançou o teor de 287 mg/L no período chuvoso. Os teores de cloreto acima de 30 mg/L contribuem de forma significativa para as elevações dos teores de STD, conforme mostra a Figura 7.15. Nota-se que existe boa correlação positiva entre cloreto acima de 30 mg/L e STD, nos dois períodos de coleta. Duas amostras se destacam pelos teores de cloreto, com valores superiores a 200 mg/L. Essas amostras têm também resultados relativamente altos de STD.

Quando se correlacionam os teores de cloreto acima de 30 mg/L com os teores de nitrato, Figura 7.16, constata-se que não existe correspondência positiva entre esses dois componentes. Essa avaliação foi realizada no intuito de verificar se os teores elevados de cloreto poderiam estar relacionados à contaminação antrópica. Apenas três amostras (C-116, C-118 e C-121) com teores mais elevados de nitrato (> 10 mg/L N) têm valores relativamente elevados de cloreto (> 30 mg/L). Por outro lado, uma amostra (C-128) anômala de cloreto (> 200 mg/L), nos dois períodos de sazonais, mostram correspondentes valores baixos de nitrato.

Na avaliação em que se consideram todas as amostras, não se observa, novamente, uma correspondência positiva entre cloreto e nitrato, Figura 7.17. A maioria das amostras se concentra na zona de baixos teores para as duas variáveis. A maior quantidade das amostras de cloreto com teores mais significativos (> 30 mg/L) registram teores correspondentes baixos de nitrato. Duas amostras (C-116 e C-121) com teores de nitrato elevados (17,7 e 36,2 mg/L respectivamente) mostram também teores elevados de cloreto (73,3 e 85,5 mg/L respectivamente). Isso, entretanto, não pode caracterizar, com segurança, uma correspondência entre as variáveis. Diante desse cenário, parece que o relativo enriquecimento do cloreto nessas águas tem fontes distintas:

- A primeira pode derivar ou ser influenciada por fatores climáticos, considerando que não existem minerais responsáveis pela contribuição de cloreto. Então, o pouco que existe provavelmente se deve às águas de recarga, isto é, às águas meteóricas que infiltram no ambiente cárstico e devido à alta solubilidade do cloreto, aliado à deficiência hídrica na circulação, pode provocar o aumento gradativo do cloreto.
- A outra possível explicação para aporte de cloreto nas águas, principalmente nos poços (C-116, C-118 e C-121), localizados respectivamente nas sedes dos municípios de Mirabela, Brasília de Minas e Ubaí, pode estar relacionada pontualmente à contaminação antrópica pontual, já que existe um crescimento dos teores de cloreto associados a teores elevados de nitrato. É importante destacar que no poço (C-116) o teor de sódio também é relativamente alto (64 mg/L), corroborando para afirmar a influência do fator antrópico como indicativo do comprometimento da qualidade de água nesses poços.

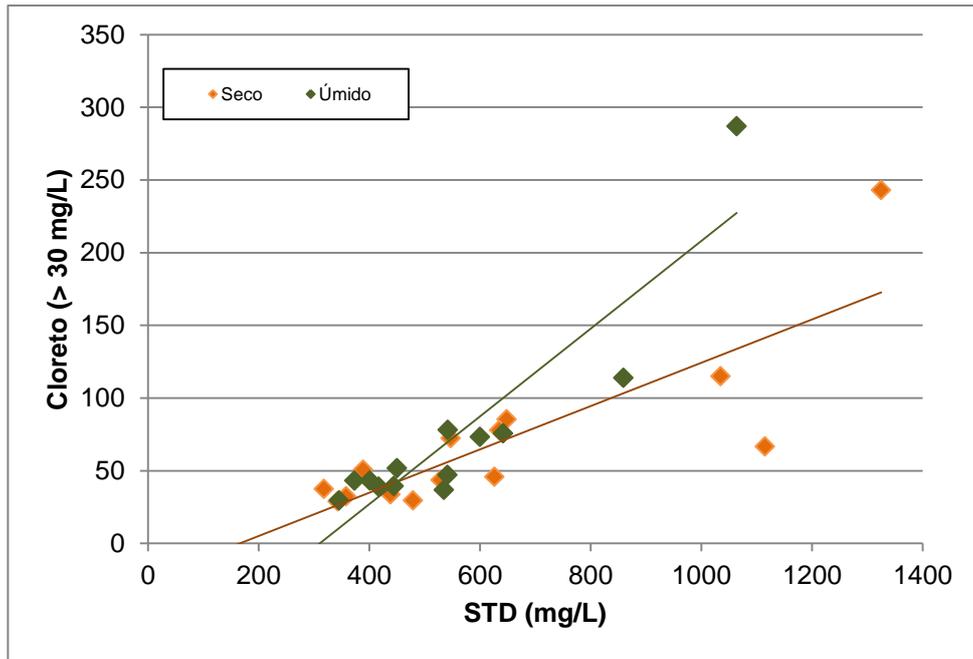


Figura 7.15 - Correlação entre cloreto e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

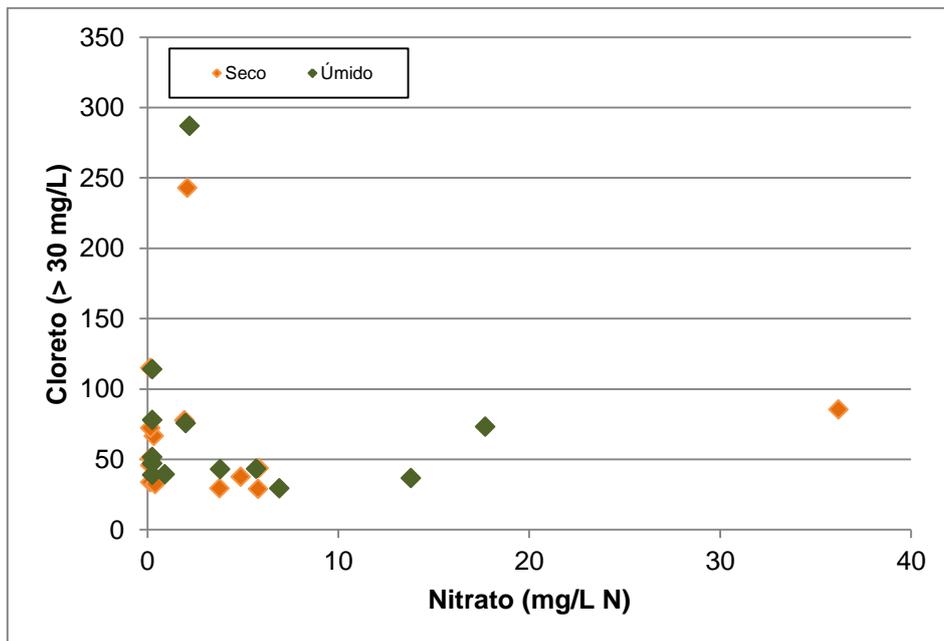
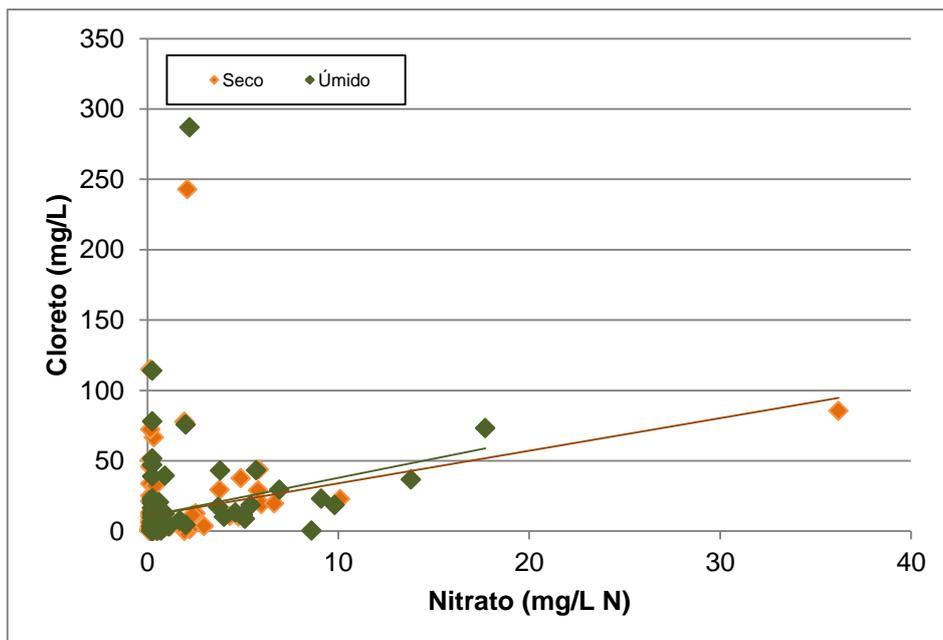


Figura 7.16 - Correlação entre cloreto e STD em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.



Salienta-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 (Velásques et al. 2003, 2007, e 2009; Costa, 2011 e Silva 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. 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 7.1). 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 7.2).

Para compreender o controle da ocorrência do ferro nessas águas foram confecções diagramas de correlações do ferro com o pH (Figura 7.18) e Eh (Figura 7.20), 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.

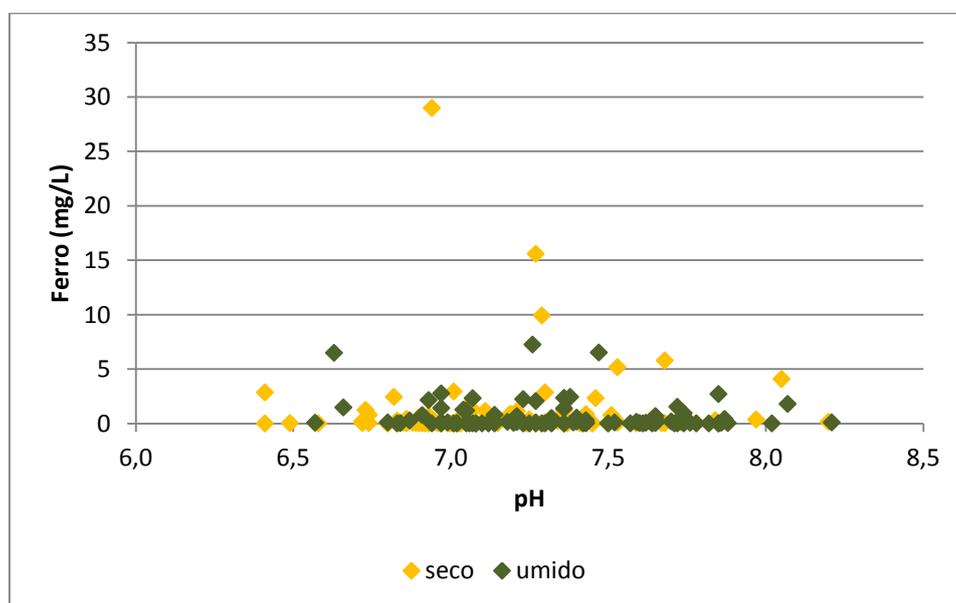


Figura 7.18 - Correlação entre ferro e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

A Figura 7.19 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.

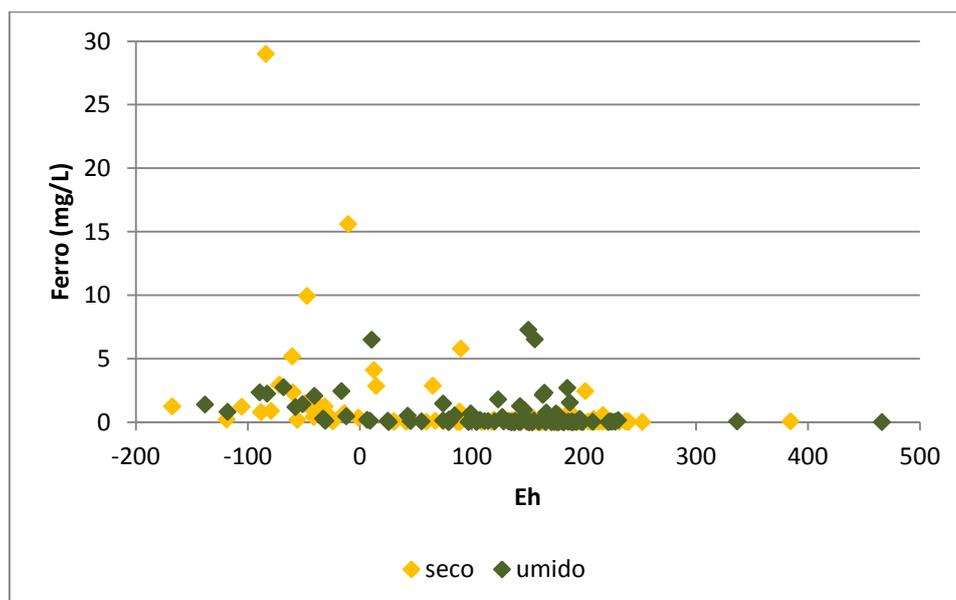


Figura 7.19 - Correlação entre ferro e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

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 7.1 e Tabela 7.2). 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 7.20) e o Eh (Figura 7.21). Na Figura 7.20 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 7.21 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.

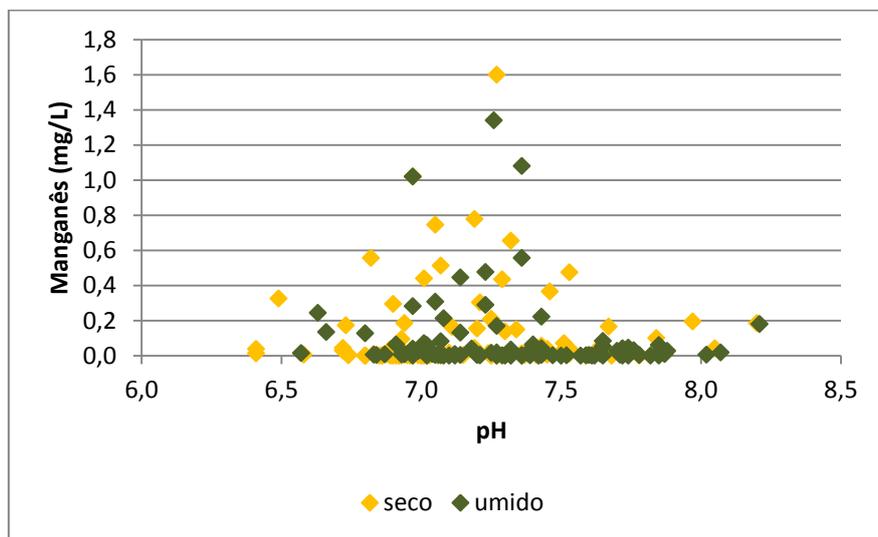


Figura 7.20 - Correlação entre manganês e pH em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

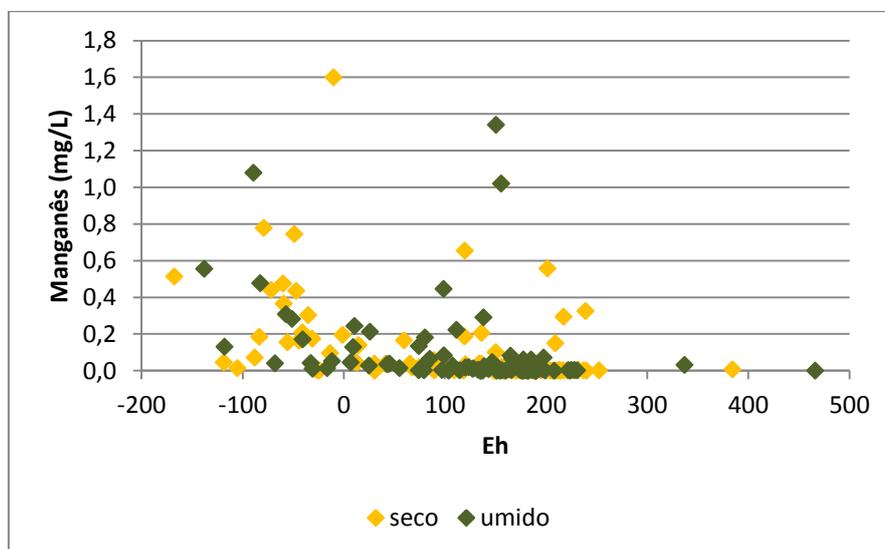


Figura 7.21 - Correlação entre manganês e Eh em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros

Para a dureza das águas subterrâneas de Montes Claros, os resultados, estão apresentados na Tabela 7.1 e Tabela 7.2, 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 7.22 e Figura 7.23). 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 7.24), bicarbonato (Figura 7.25) e subordinadamente o magnésio (Figura 7.26), 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 (Tabela 7.1), 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.

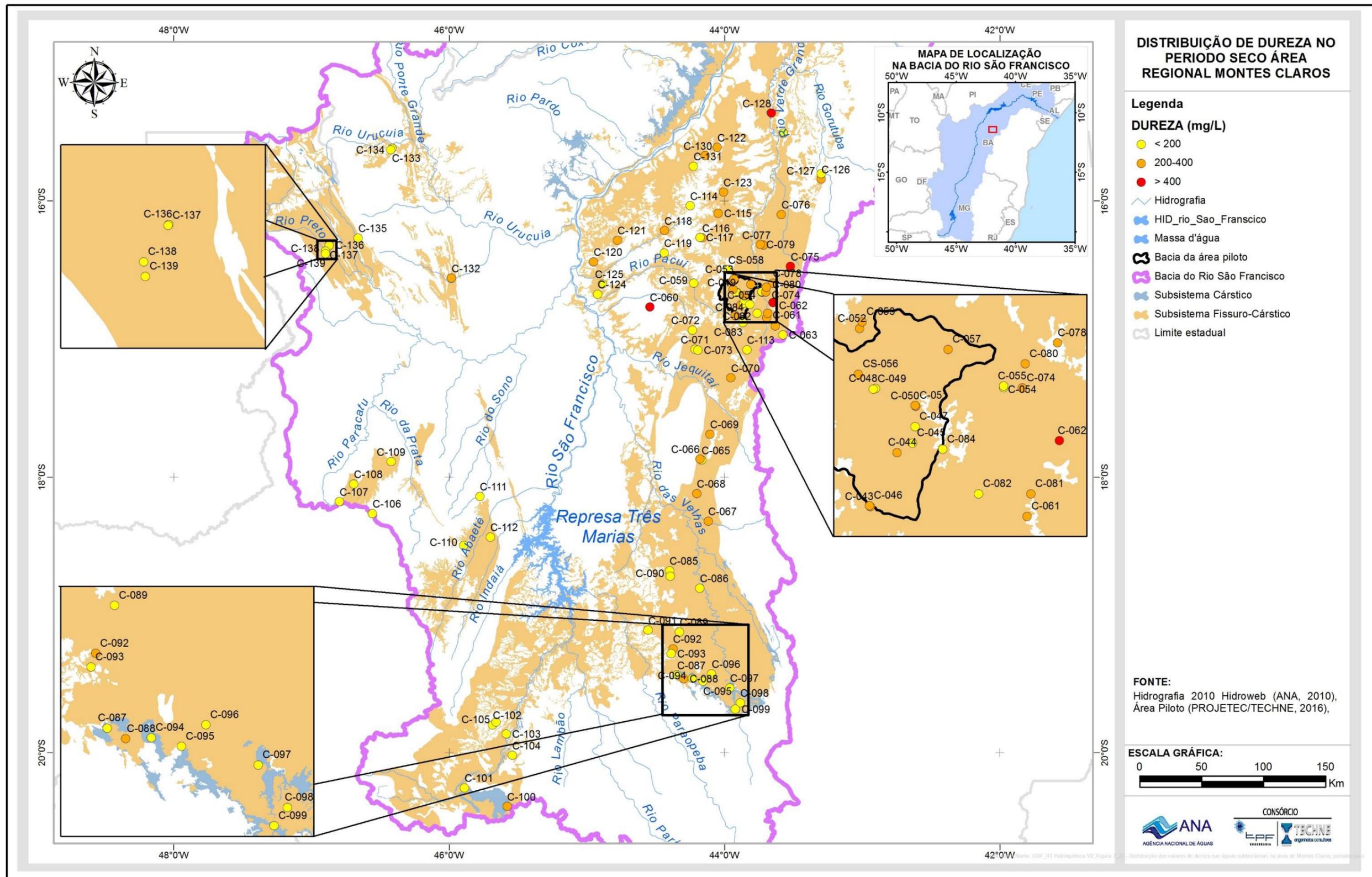


Figura 7.22 - Distribuição dos valores de dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período seco.

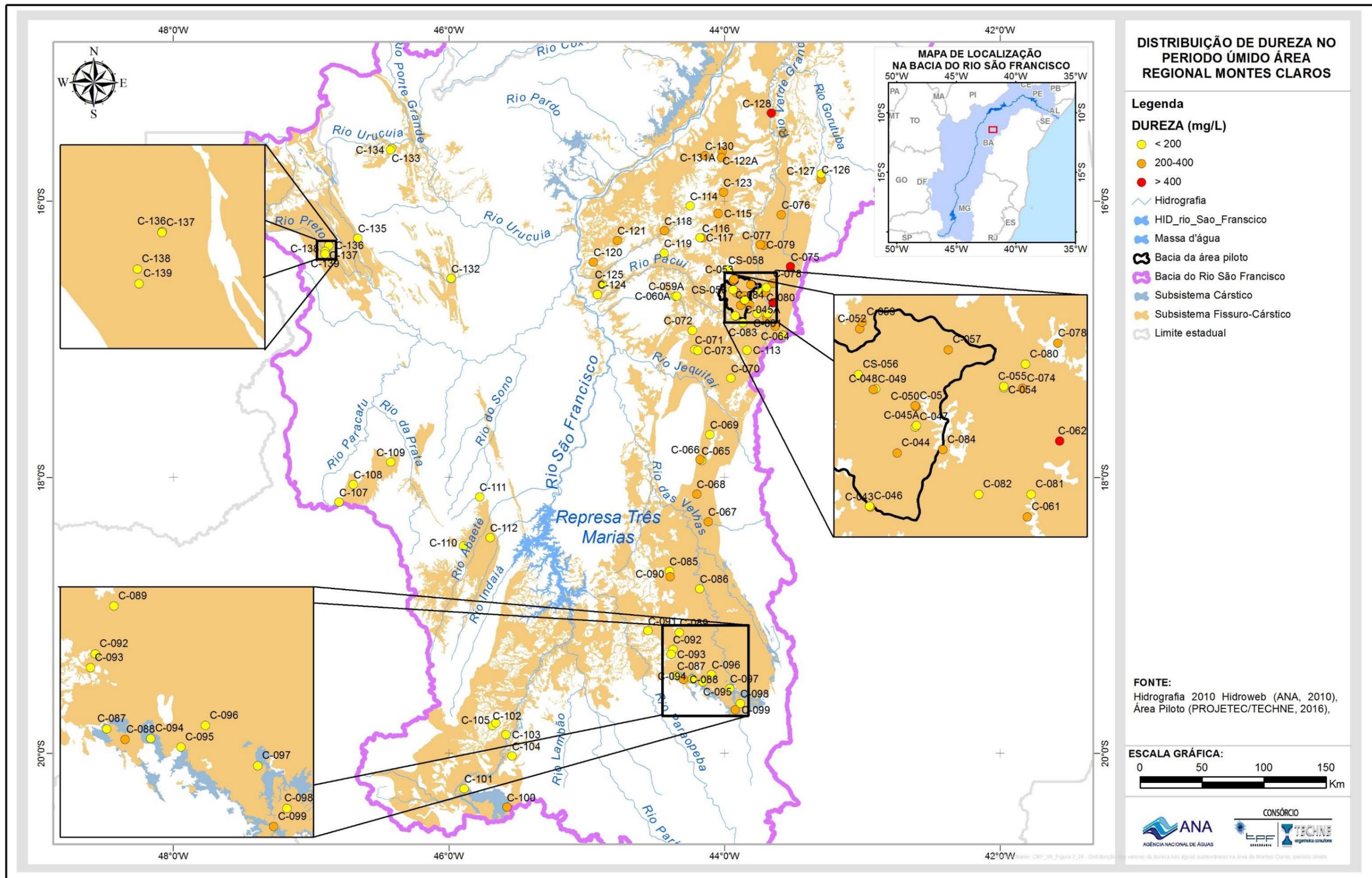


Figura 7.23 - Distribuição dos valores da dureza nas águas subterrâneas na área de Montes Claros, período úmido.

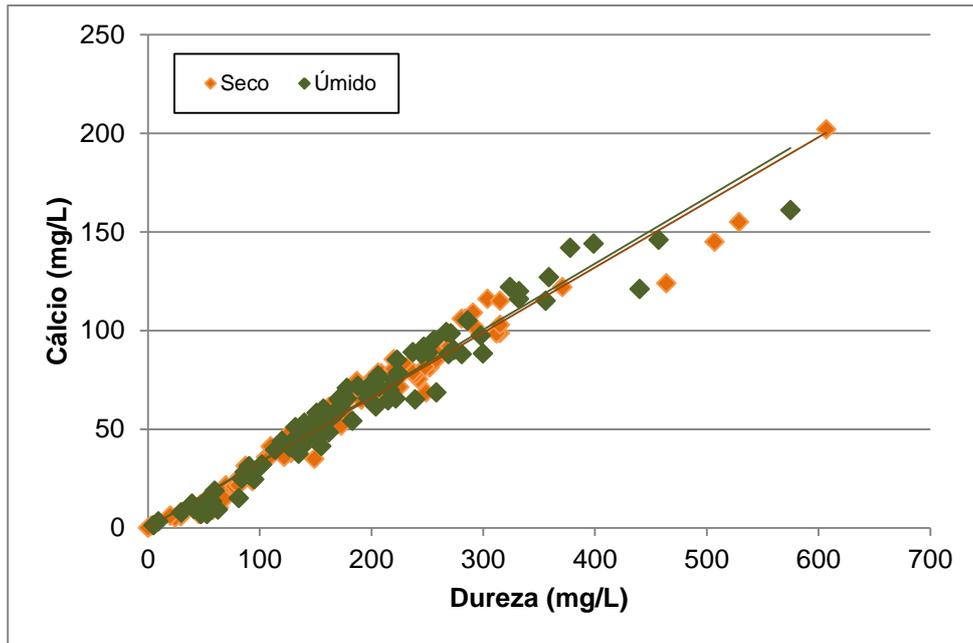


Figura 7.24 - Correlação entre dureza e cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

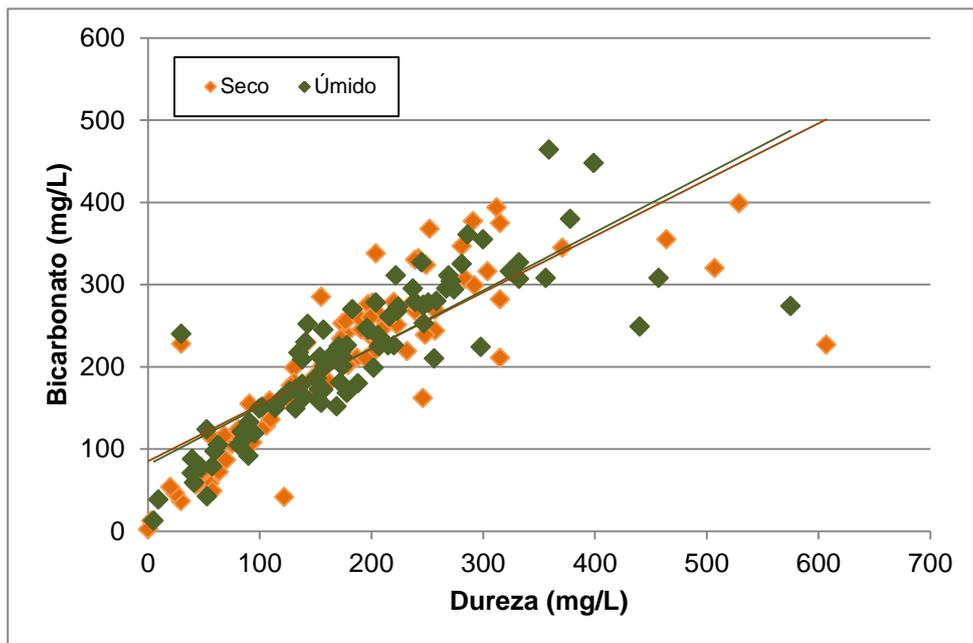


Figura 7.25 - Correlação entre dureza e bicarbonato em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

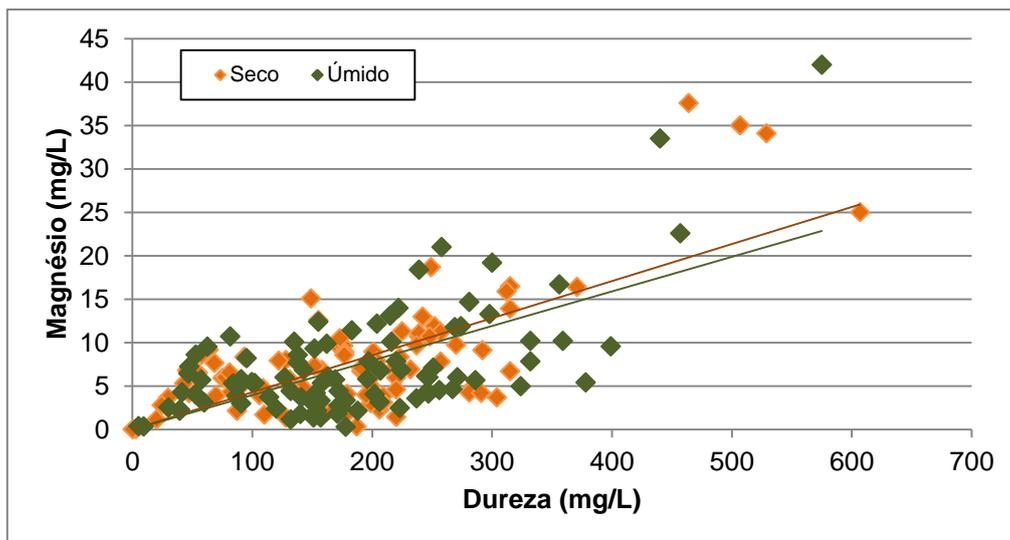


Figura 7.26 - Correlação entre dureza e magnésio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco e úmido, na região de Montes Claros.

Tabela 7.4 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO₃)

| Tipo | Teor de CaCO ₃ (mg/L) |
|-------------------|----------------------------------|
| Branda | < 50 |
| Pouco Dura | 50 – 100 |
| Dura | 100 – 200 |
| Muito Dura | > 200 |

7.2 Fácies hidroquímicas

Na Figura 7.27 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 nas Figuras 7.28 e Figura 7.29, 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, a 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.

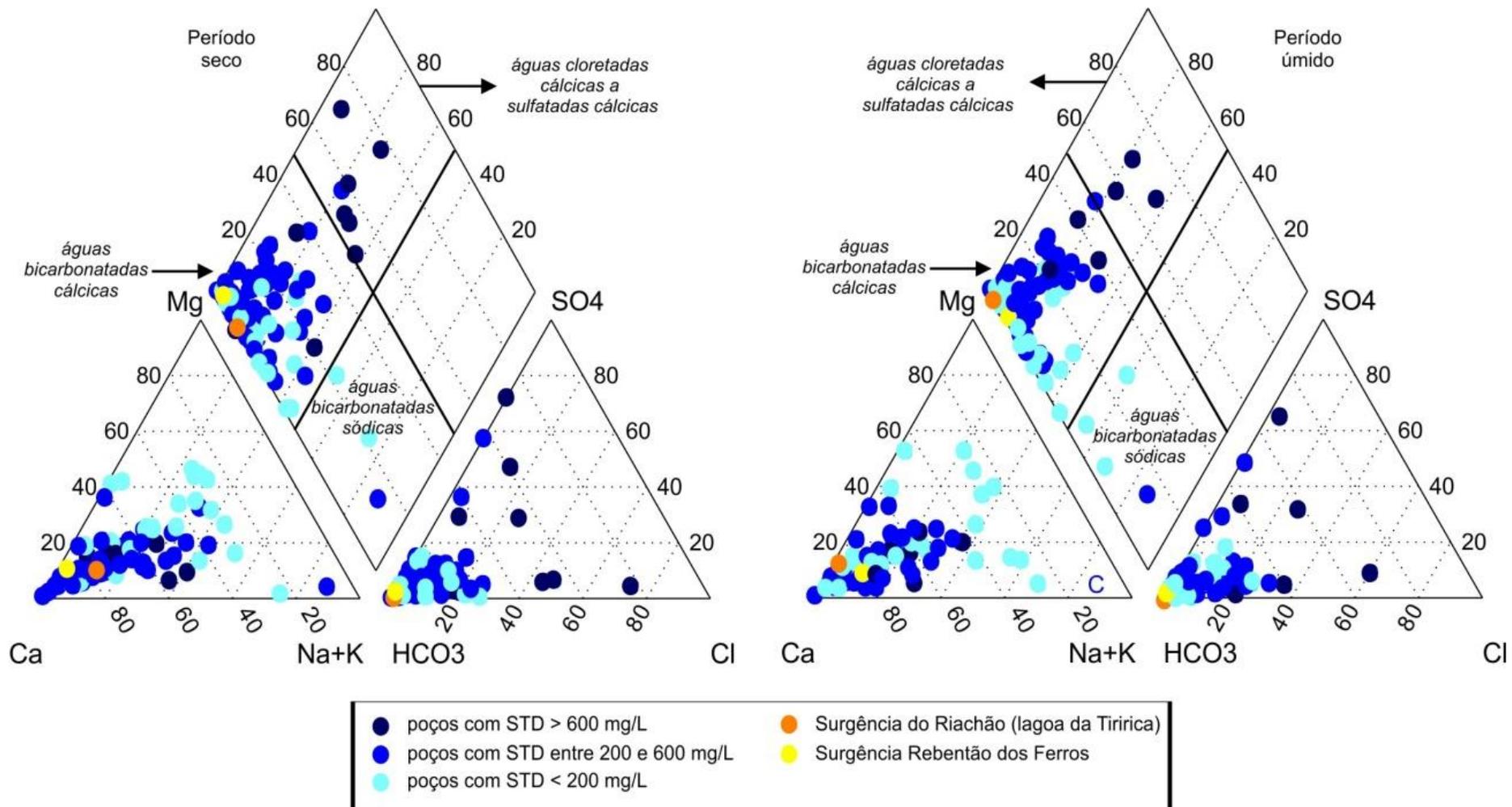


Figura 7.27 - Diagrama de Piper das amostras coletadas no período seco e úmido, na área regional de Montes Claros e intervalos STD.

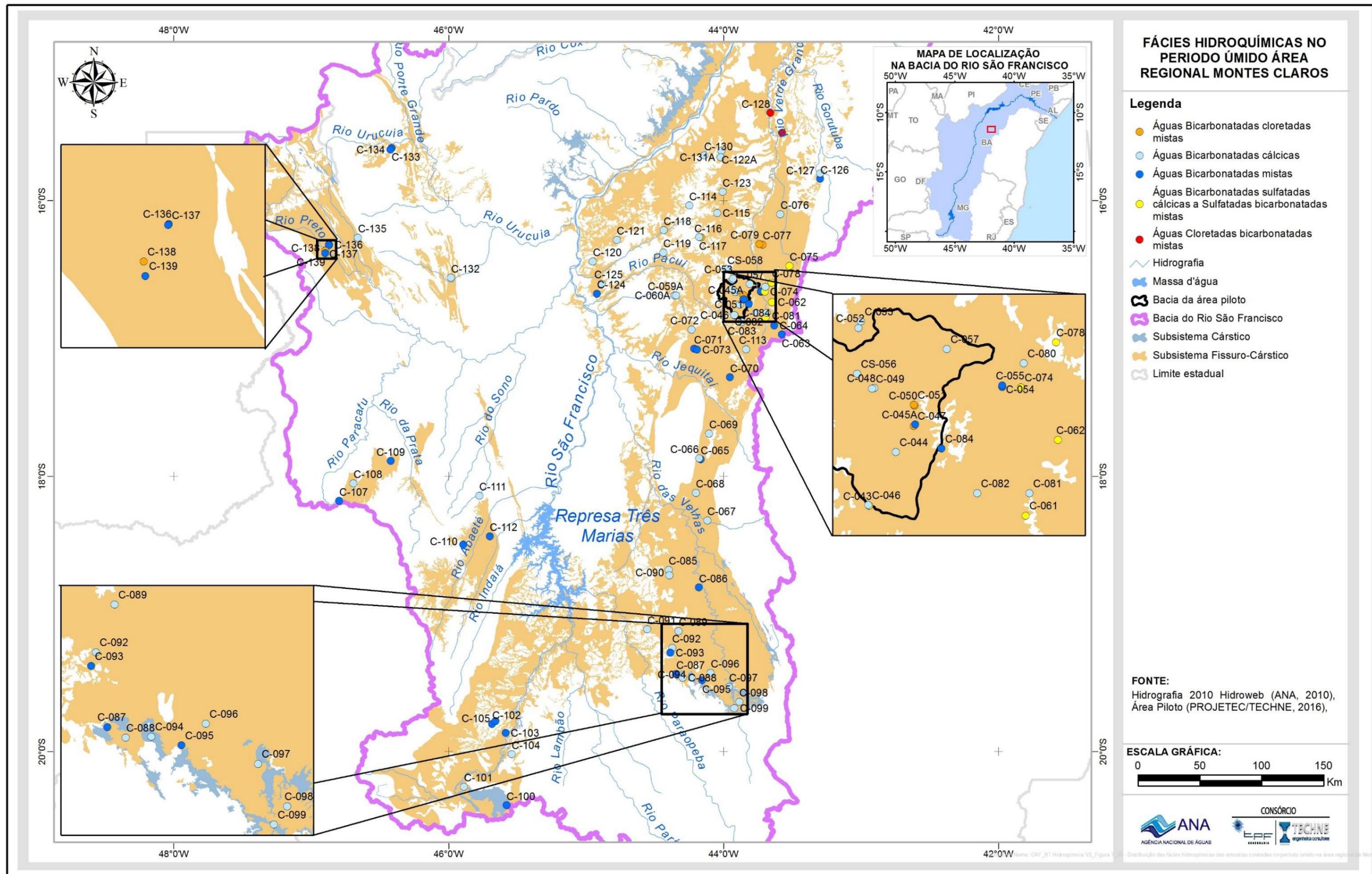


Figura 7.29 - Distribuição das fácies hidroquímicas das amostras coletadas no período úmido na área regional de Montes Claros.

7.3 Parâmetros Específicos

7.3.1 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 7.1 e os resultados analíticos apresentados na Tabela 7.5.

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).

7.3.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 5 amostras na área regional de Montes Claros, cuja localização encontra-se na Figura 7., 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 capítulo 2 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 7.5 – 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 |
| 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 |
| 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 |
| 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.

7.3.3 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 7.6) cuja localização encontra-se na Figura 7.1. Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de quantificação.

Tabela 7.6 – 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 |
| 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 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.

Os guias atuais para determinar a potabilidade das águas baseiam-se em dois critérios distintos:

- Risco a saúde: diz respeito aos efeitos tóxicos, carcinogênicos e mutagênicos da água. Representam uma série de constituintes químicos (que são fixados por concentrações máximas permitidas) e bacteriológicos.
- Aspectos organolépticos (ou estéticos): conjunto de parâmetros caracterizados por provocar estímulos sensoriais que afetam a aceitação para consumo humano, mas que não necessariamente implicam risco à saúde.

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 7.6 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 7.7 (substâncias organolépticas).

Tabela 7.6 - 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 7.7 - 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, sulfato, cloreto, nitrato, ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras. Os referidos parâmetros e os teores obtidos são apresentados nas Figuras 7.30 a Figura 7.36 e a Tabela 7.8 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 7.8 – 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.

| 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%) |

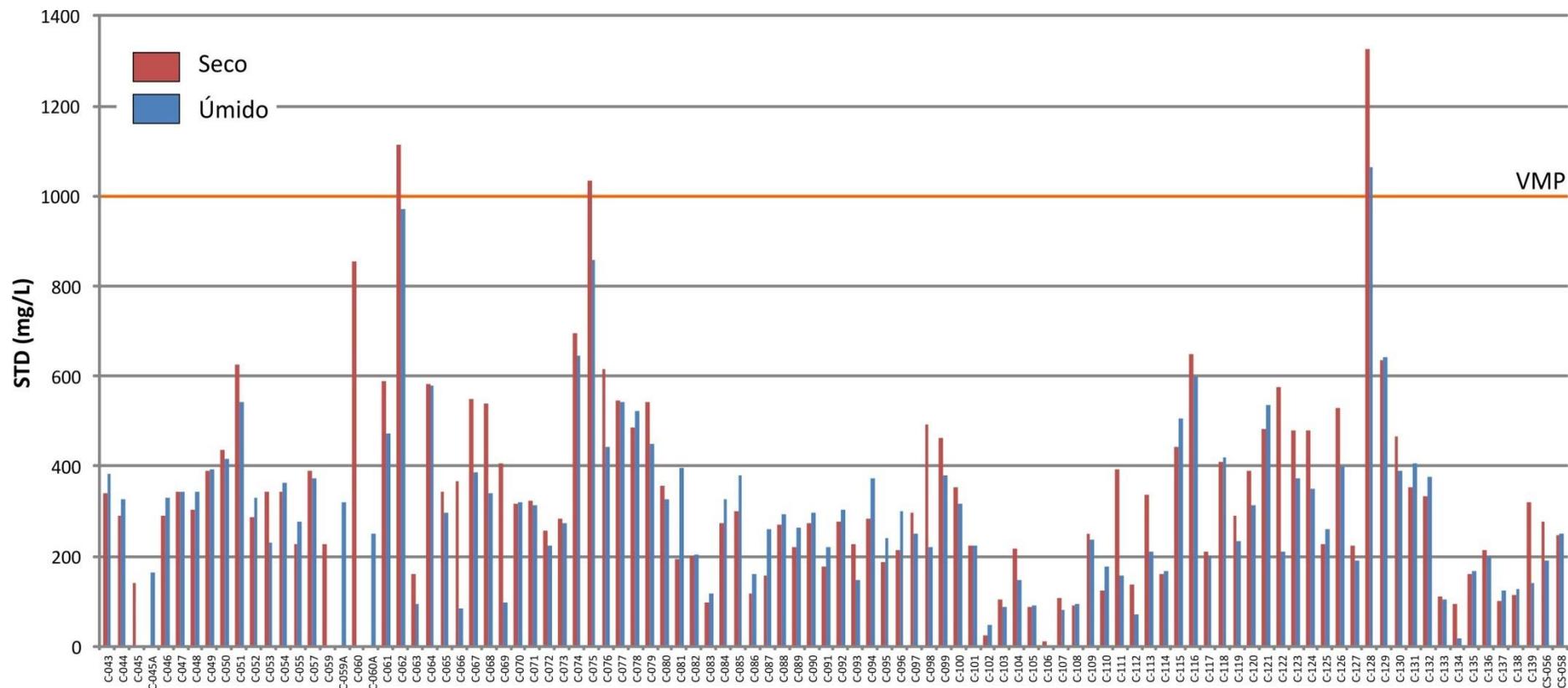


Figura 7.30 - Resultados analíticos para o parâmetro STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

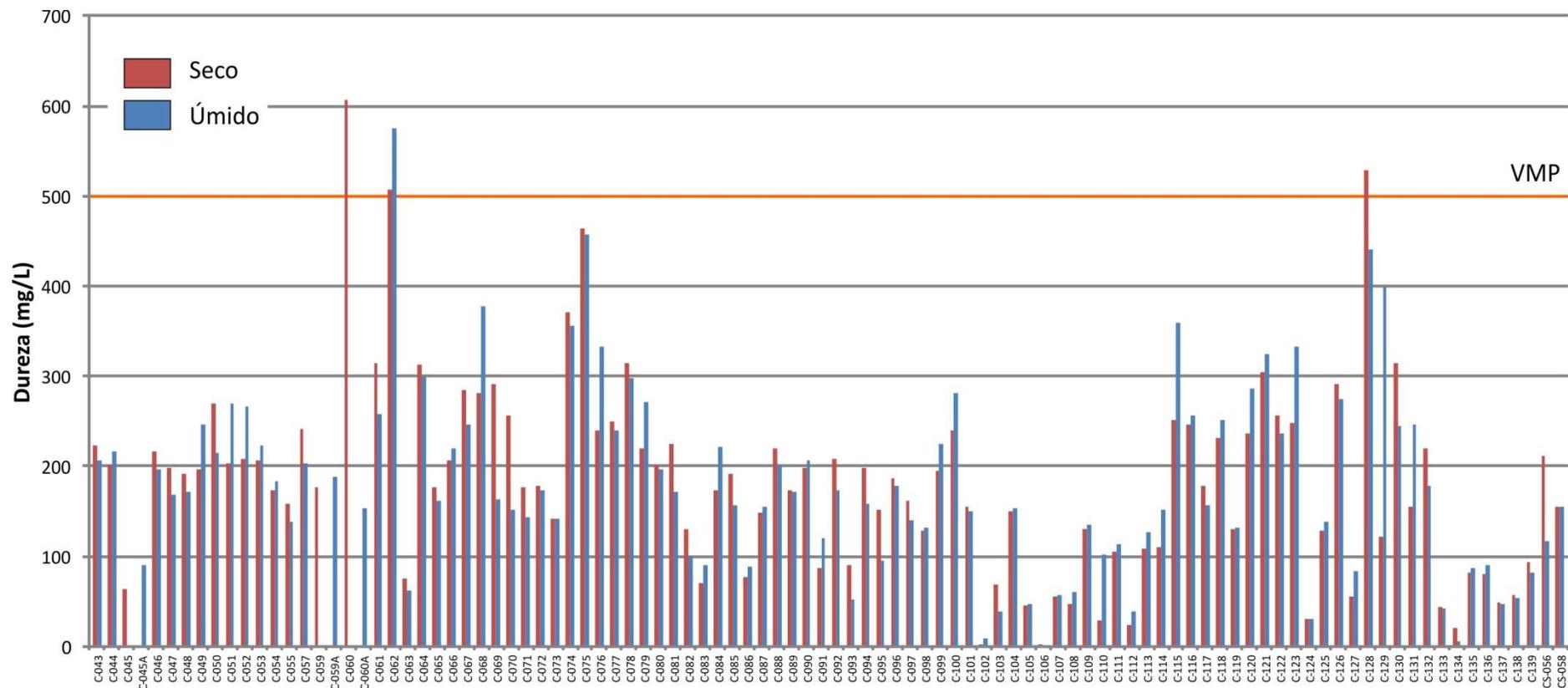


Figura 7.31 - Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

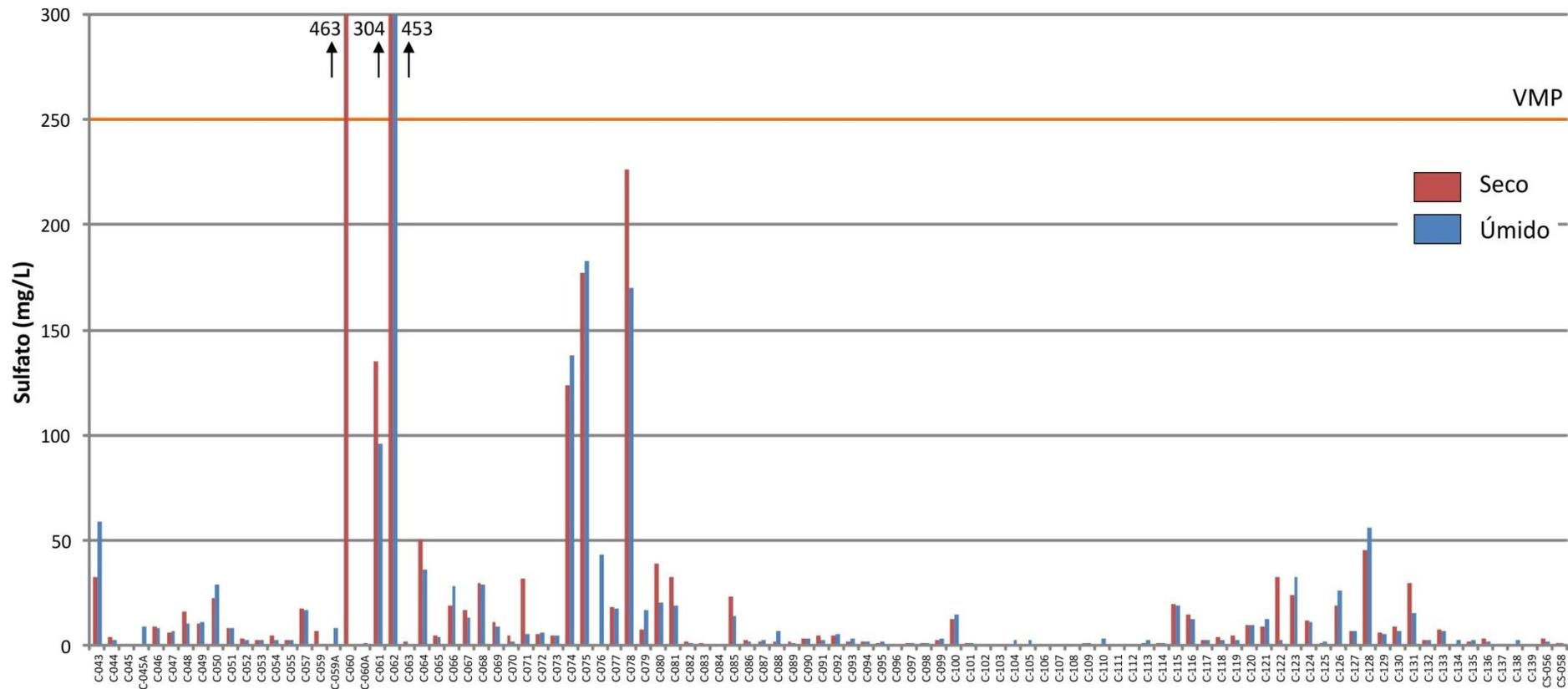


Figura 7.32 - Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

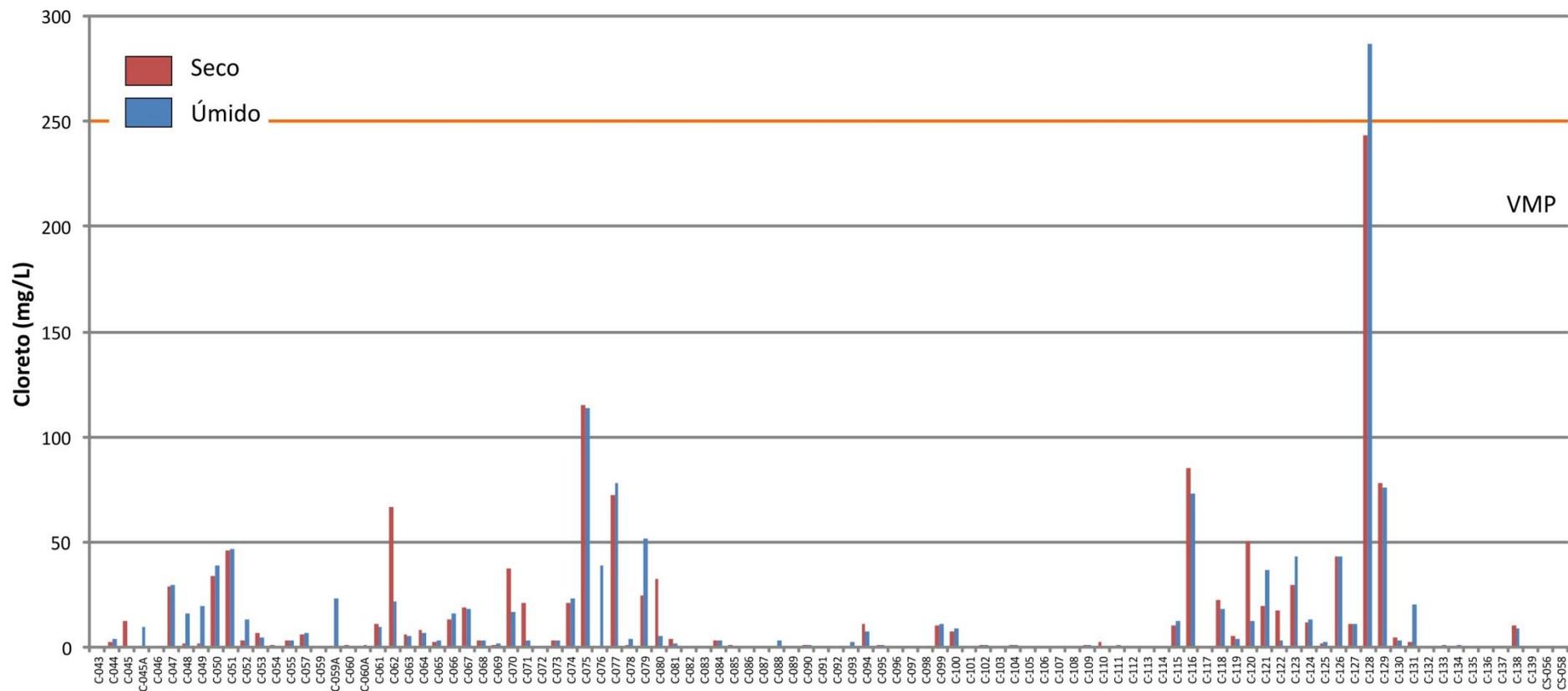


Figura 7.33 - Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

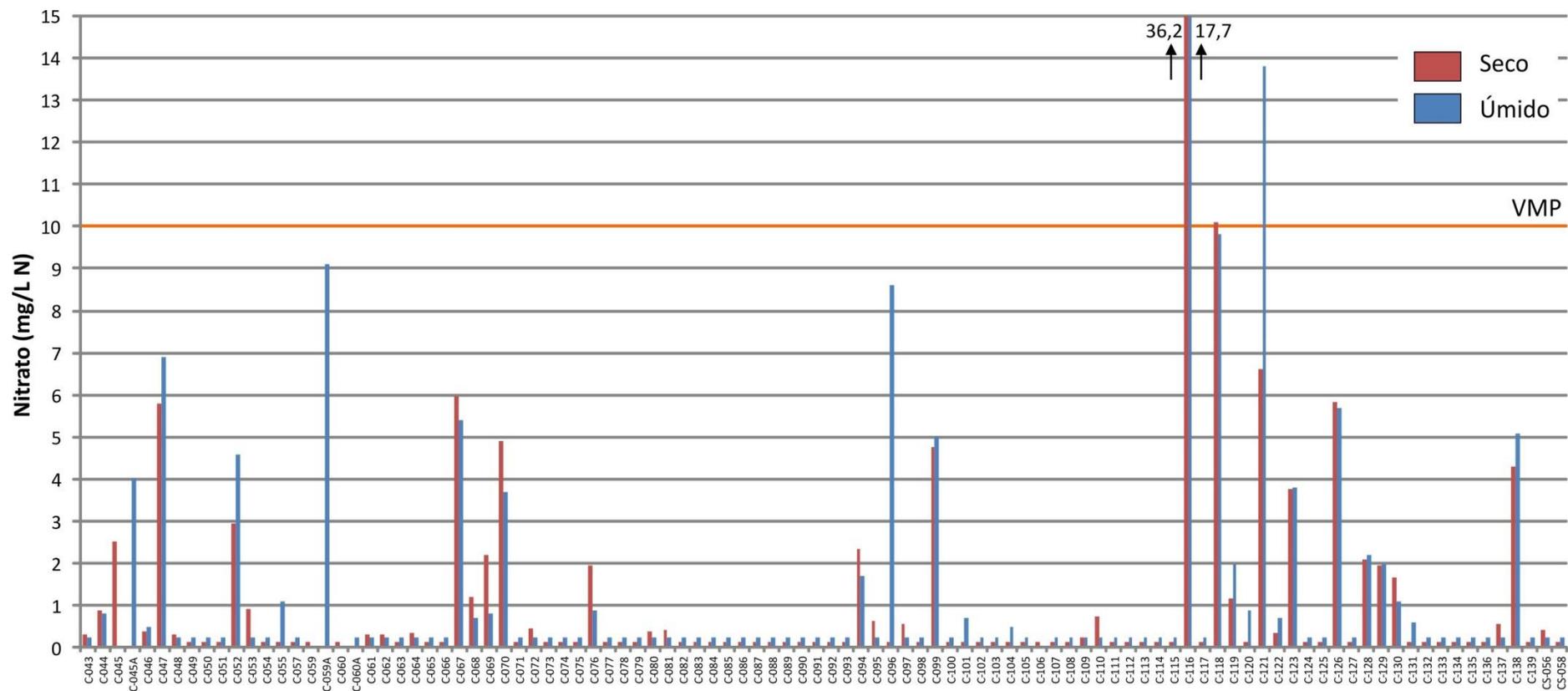


Figura 7.34 - Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP

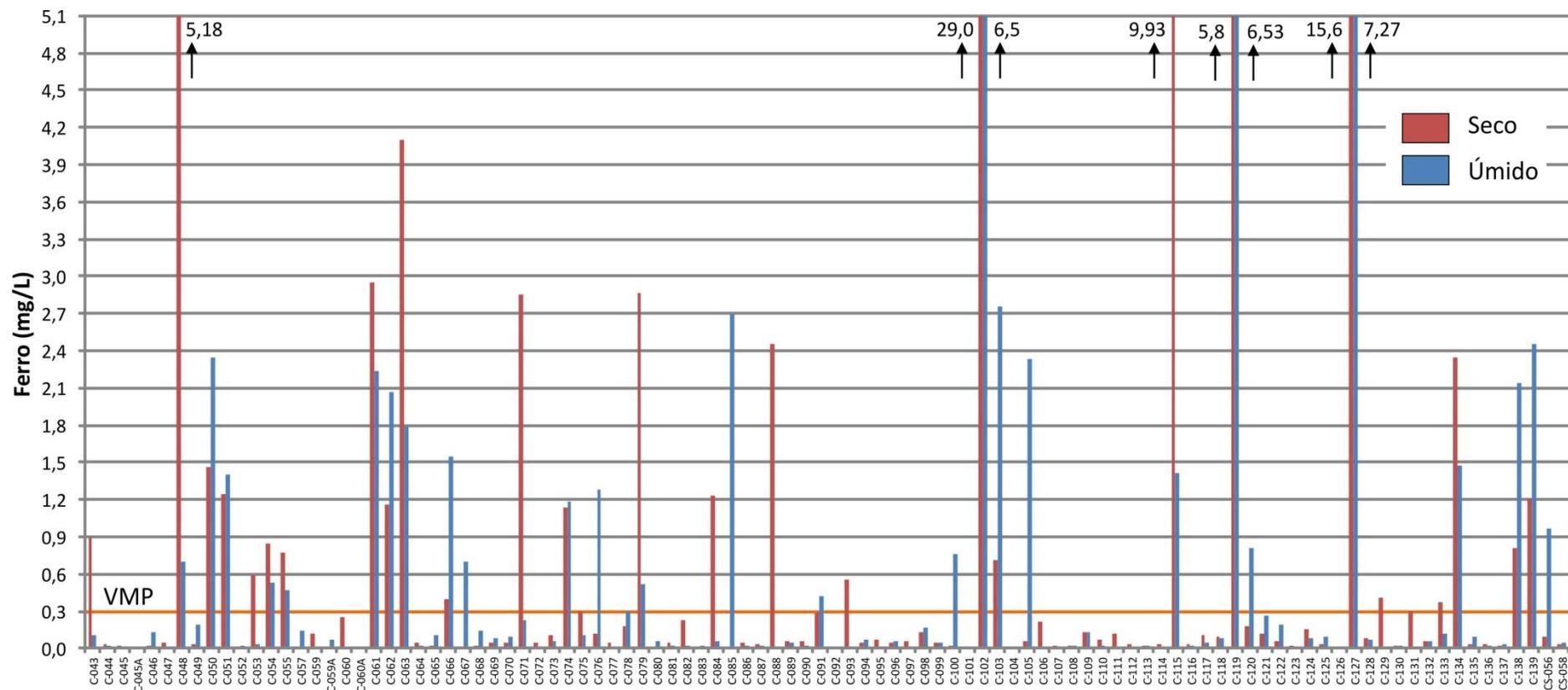


Figura 7.35 - Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

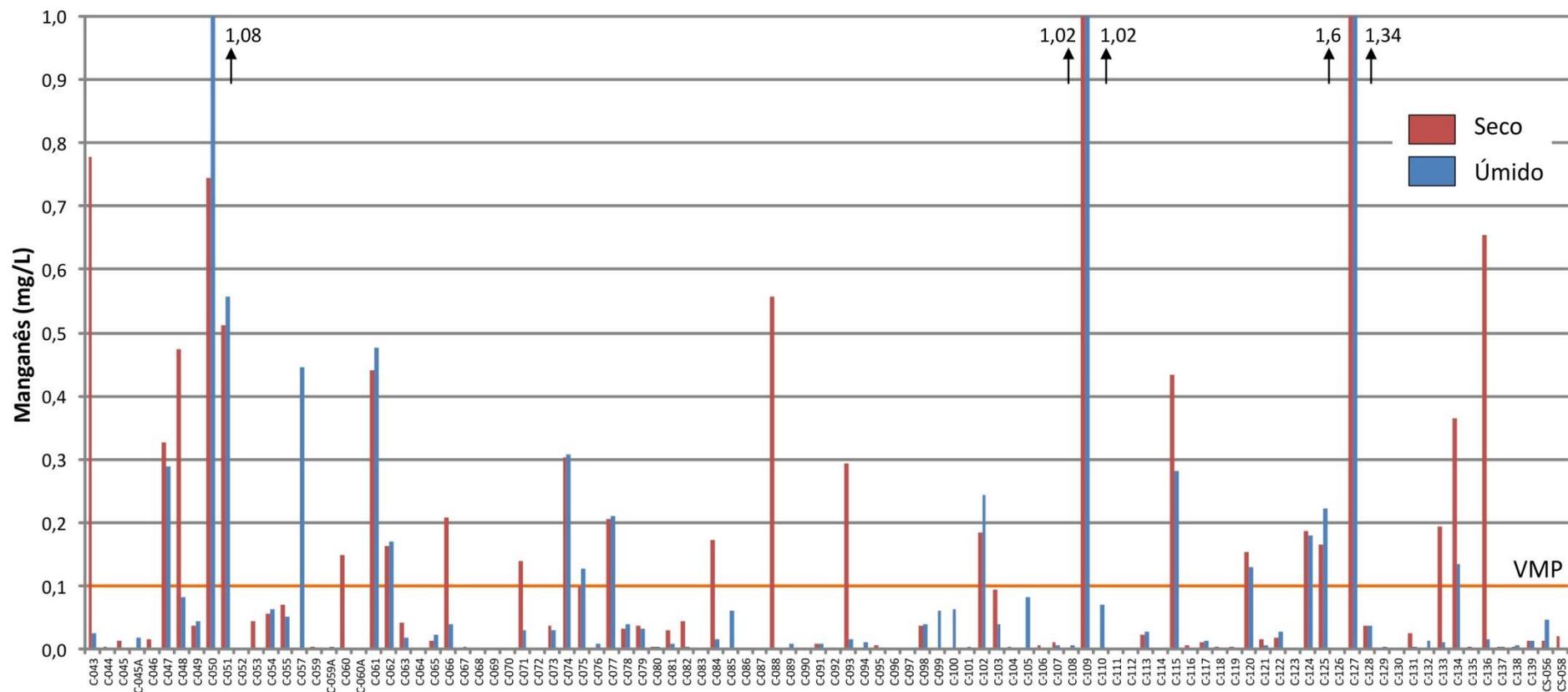


Figura 7.36 - Resultados analíticos para o parâmetro manganês e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.

7.5 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 7.9.

Tabela 7.9 – 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 |

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

As razões isotópicas de $\delta^{18}O$ e δ^2H estão representadas na Figura 7.37, 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 RMM, 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 7.39 – 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 7.38 – 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.

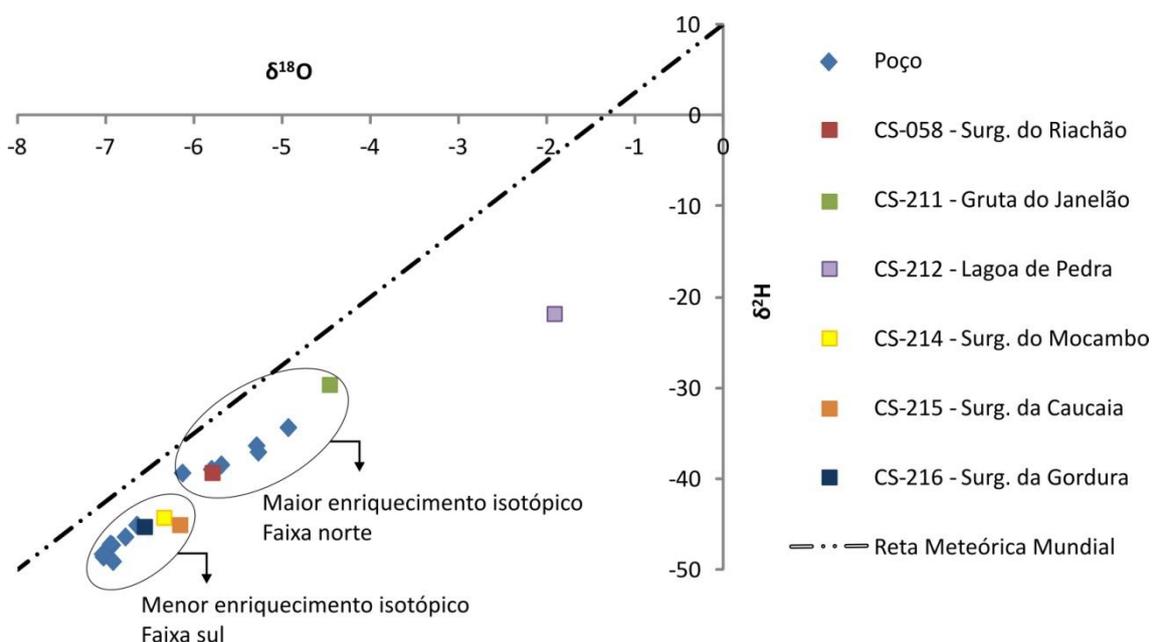


Figura 7.37 - Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras.

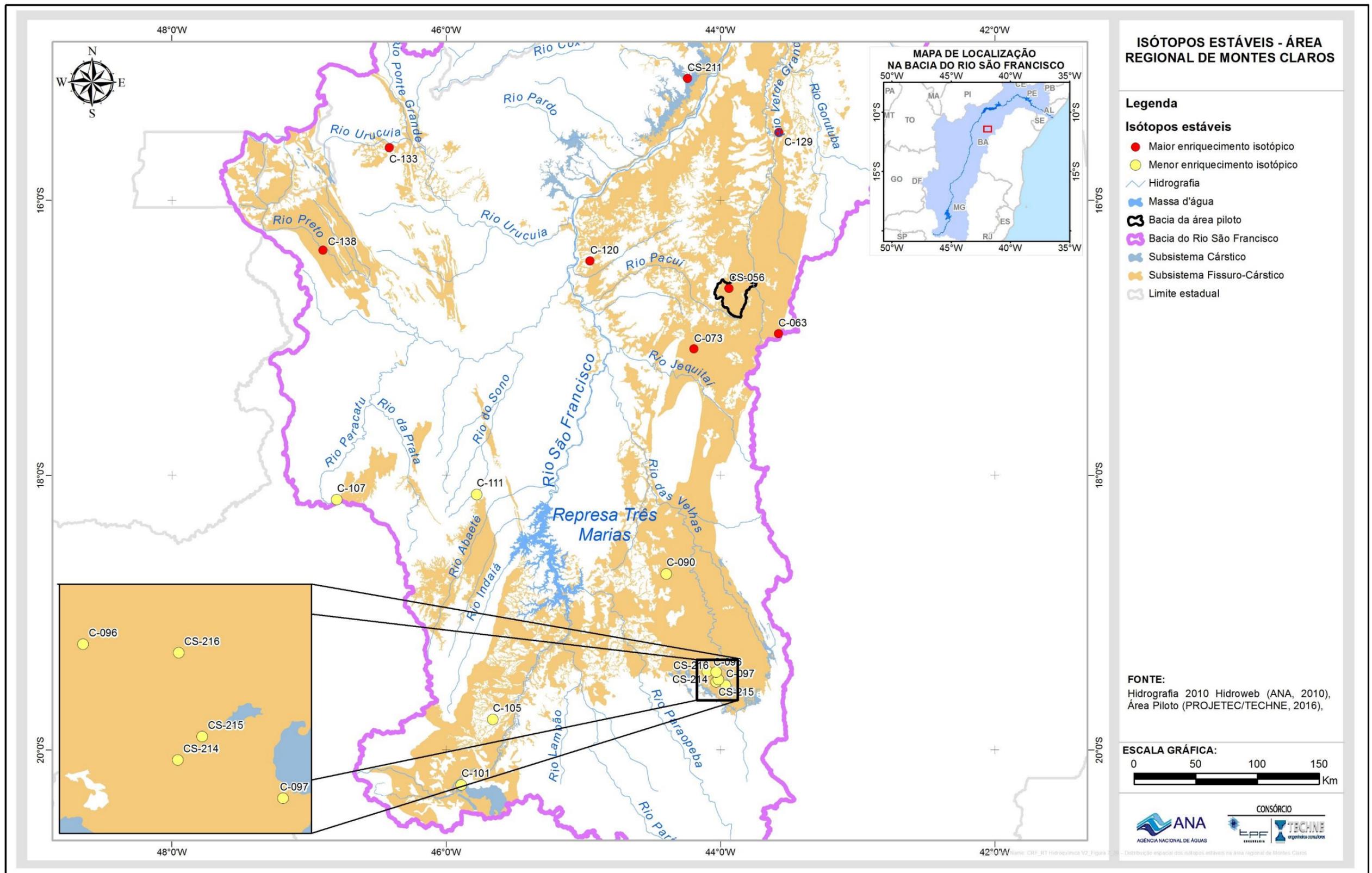


Figura 7.38 – Distribuição espacial dos isótopos estáveis na área regional de Montes Claros

7.5.2 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 *et al.*, 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 *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.

Na área de estudo foram realizadas análises de isótopos de estrôncio na segunda campanha de amostragem (período úmido), nos pontos indicados na Tabela 7.9 e visualizados na Figura 7.48.

Com base na Tabela 7.9 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.

7.6 Considerações finais

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 Urucuia 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. Referências Bibliográficas

- Albuquerque, J.P.T., 2013. Situação volumétrica dos reservatórios das hidrelétricas da CHESF. <http://www.remabrasil.org/Members/suassuna/campanhas/situacao-volumetrica-dos-reservatorios-das-hidreletricas-da-chesf-02-08-2013/view>. (Acessado em 11/08/2016)
- ANA, 2013. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil.
- APHA. 2005. Standard Methods for the examination of water and wastewaters, 21 th edition, American Public Health Association, Washington.
- APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2.ed. 4th corrected reprint. Amsterdam: A.A. Balkema Publisher, 2006.
- Banner, J. L. 2004 - Banner Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 65 (2004) 141 – 194
- Bernardes, Jr. C., R. Hirata, J. Mendes, e R. Cleary. Remedial action for an industrial open dump-proposed activities and perspectives. *Water Science and Technology* 24(11): 271-281. 1991.
- Brasil/MMA, 2011. Diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília.
- Cheremisinoff, P. A guide to underground storage tanks evaluations, site assessment and remediation. New Jersey: Prentice-Hall. 1992.
- CPRM/CBPM, 2003. Mapa Geológico do Estado da Bahia – Escala 1:1.000.000. Versão 1.
- CPRM/COMIG, 2003. Mapa geológico do estado de Minas gerais, 1:1.000.000.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. Hidrologia Subterrânea. Ediciones Omega (I e II): Barcelona, 1983, 2359p.
- Da Silva, L.M.C., 2006. Apresentação na Oficina de Vazão Ecológica: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: 24-25 de novembro de 2006, CBHSF.
- Doerfliger, N., Zwahlen, F. Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). 1998.
- FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; e DEMETRIO, J. G. A. (Coordenadores). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 3 Ed, 812p, 2008.
- Foster, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegenungh (eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands*. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands. 1987.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M., 2002. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. World Bank, GWMATE. Washington, 101p.

Foster, S.S.D.; Hirata, R.; Gomes, D.; d'Elia, M.; Paris, M., 2006. Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Tradução: Sônia Vieira. São Paulo: Banco Mundial, Servmar, 104 p

Frantz, L. C. 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, 2005.

Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. Proteção da qualidade da água subterrânea – um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial. Washington, D. C. 2006.

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

GAT. J. R. 1971. Comments on stable isotope method in regional groundwater investigation. *Water Resource Research*, (7): 980-993.

GONÇALVES, M.V; CRUZ, M.J. M.; COUTINHO, E. F.S. 2011 - Flúor em Água Subterrânea usada pelo Sistema de Abastecimento Público do Município de Serra do Ramalho, Bahia, II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo

GOSSELIN, D.C.; HARVEY, F.E; FROST, C.; STOTLER, R; MACFARLANE, P.A. 2004. Strontium isotope geochemistry of groundwater in the central part of Dakota (Great Plains) aquifer, USA. *Applied Geochemistry*, 19:359-377

Guerra, A.M., 1986. O Sistema Hidrogeológico dos Carstes Bambuí na Região de Irecê – BA. *Revista Águas Subterrâneas*, n. 10.

GUERRA, A. M. Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê – Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. USP. 1986.

HISCOCK, K. 2005. *Hydrogeology. Principles and Practice*. xvi + 389 pp. Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing. Price £34.95 (paperback).

IGLESIAS, M; UHLEIN, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Rev. bras. geociênc.* v.39 n.2 São Paulo jun. 2009.

KENDALL, C.; MCDONNELL, J.J (Eds.). 1998. *Isotope Trace in Catchment Hydrology*, Elsevier Science, Amsterdam, 839p.

Kostecki, P.T.; E. Calabrese. *Petroleum contaminated soil: remediation techniques, environmental fate, and risk assessment*. Vol. 1. Mich.: Publishers. 1989.

Mackey, D.; Cherry, J. Groundwater contamination: pump and treat remediation. *Environmental Science and Technology* 23: 630-636. 1996.

McNeely, R.N., V.P. Neimanis, and L. Dwyer, 1979. *Water Quality Sourcebook: A Guide to Water Quality Parameters*. Environmental Canada Publications, Ottawa, Canada.

MCNUTT, R.H. 2000. Strontium isotopes. In: Cook, P.G., Herczeg, A.L. (Eds.). Environmental traces in Subsurface Hydrology. Kluwer Academic Publishers, pp.234-260.

Manoel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese de Doutorado: Hidrogeologia e Recursos Minerais. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências.

MARTINS, Violeta de Souza. Estudo de Inclusões Fluídas e de Isótopos de Estrôncio dos Depósitos de Fluorita da Serra do Ramalho (Bahia) e Montalvânia (Minas Gerais). 85 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 2001.

Missi, A. (1979) O Grupo Bambuí no Estado da Bahia. Geol.Rec. Min. Est. Bahia, Textos Básicos, vol.1: 120-155.

NEGRÃO, F. I. Caracterização hidrogeoquímica e vulnerabilidade do sistema hidrogeológico cárstico da região de Irecê-Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 1987, 86p.

Nossa, T.C.B., 2011. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Tese de doutoramento apresentada ao IG/UFBA, Salvador/BA.

Pankow, J, R. Johnson, J. Houck, S. Brillante, e W. Bryan. 1984.

Parron, L, M. Muniz, D, H F. Pereira, C, M. Manual de Procedimentos de Amostragem e Análise Físico-Química de Água, 2011.

Sax, N. Dangerous properties of industrial materials, sixth edition. Nova York: Van Nostrand Reinhold. 1984.

PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions American Geophysical Union 25: 914 – 923.

PIRES, Maria Bethânia de Oliveira. Efeitos da fluorose dentária da exposição à sobre-concentração de fluoreto em diferentes períodos da formação do dente. 2001. 74p. Dissertação (Mestrado, Odontologia Social e Preventiva) – Centro de Pós-Graduação, Universidade São Camilo, Campinas. Ramos, S.O., 2005. Variações sazonais dos níveis hidrostáticos do aquífero cárstico da região de Irecê, Bahia: Implicações para estimativa da recarga. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências, Univ. Federal da Bahia, 137 p.

Santos, R. A.; Cruz, M. J. M.; Nascimento, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Caderno de Geociências, nº 7, 2010.

Schoeller, H. (1962) Les eaux souterraines. Paris, Mason. 642p.

SCHIO, R, Z. 2013. Caracterização catiônica e aniônica de águas subterrâneas do médio curso do rio São Francisco, oeste do estado da Bahia. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília/ Faculdade UnB Planaltina.

SILVA, M, E - 1987 - O sistema de dobramento Rio Preto e suas relações com o craton do São Francisco. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo – USP.

Suassuna, J., 2008. Transposição do rio São Francisco na perspectiva do Brasil real. Editora Porto de Idéias, São Paulo.

Velásquez L. N. M.; Fantinel, L. M.; Costa, W. D.; Uhlein, A.; Ferreira, E. F. E.; Castilho, L.S.; Paixão, H. H. 2003. Origem do Flúor na Água Subterrânea e sua relação com os casos de fluorose dental no município de São Francisco, Minas Gerais. Belo Horizonte: Fapemig (Relatório CRA 294/99),138p.

Velásquez L.N.M., Uhlein A., Fantinel L.M., Vargas A.M.D., Ferreira E.F., Castilho L.S. de, Aranha P.R.A. 2007. Investigação hidrogeológica do flúor em aquíferos carbonáticos do Médio São Francisco, MG, e epidemiologia da fluorose dentária associada. Relatório CNPq. 130 p.

Velásquez L.N.M., Fantinel L.M., Fleming P.M., Minardi P.S.P., Rodrigues P.C.H., Nacif W.F.N., Viola Z.G.G., Silva, S.M., Soares L.C., Costa D.A., Pereira C., Freitas, A.M. 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: Fapemig (EDT 83032/06) 236p

WEIGHT, W.D. & SONDEREGGER, J.L. Manual of applied field Hydrogeology. New York: McGraw-Hill, 608 p., 2000.

Tripet, J. P.; Doefrfliger, N.; Zwahlen, F.; Delporte, C. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. Acta carsologica, v. 12, p. 163-171, 2000.

ZUBLENA, J. P.; COOK, M. G.; ST CLAIR, M. B. Pollutants in groundwater: health effects. 2001. Disponível: <http://ces.soil.ncsu.edu/soilscience/publications/soil facts>. Acessado em 10 out 2010.

9. Anexos

Disponíveis em meio digital

Anexo 1 – Identificação das Amostras

Anexo 2 – Resultados da 1ª Campanha de coleta de água

Anexo 3 – Resultados tabelados – 1ª Campanha

Anexo 4 – Resultados de erro no Balanço Iônico – 1ª Campanha

Anexo 5 – Resultados da 2ª Campanha de coleta de água

Anexo 6 – Resultados tabelados – 2ª Campanha

Anexo 7 – Resultados de erro no Balanço Iônico – 2ª Campanha



**MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE**

**GOVERNO
FEDERAL**

