



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS



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



República Federativa do Brasil

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

Ministério do Meio Ambiente

Sarney Filho

Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Tibério Magalhães Pinheiro

Victor Sucupira

Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Leonardo de Almeida (Gestor do Contrato)

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

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

RELATÓRIO FINAL

VOLUME III – ÁREAS PILOTO

TOMO 2 - ÁREA PILOTO DA BACIA DO RIO DO VIEIRA/MG

© 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 Final – Volume III – Áreas Piloto – Tomo 2 –Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira /MG/ Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018.
332p.

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 Fissuro-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 Fissuro-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

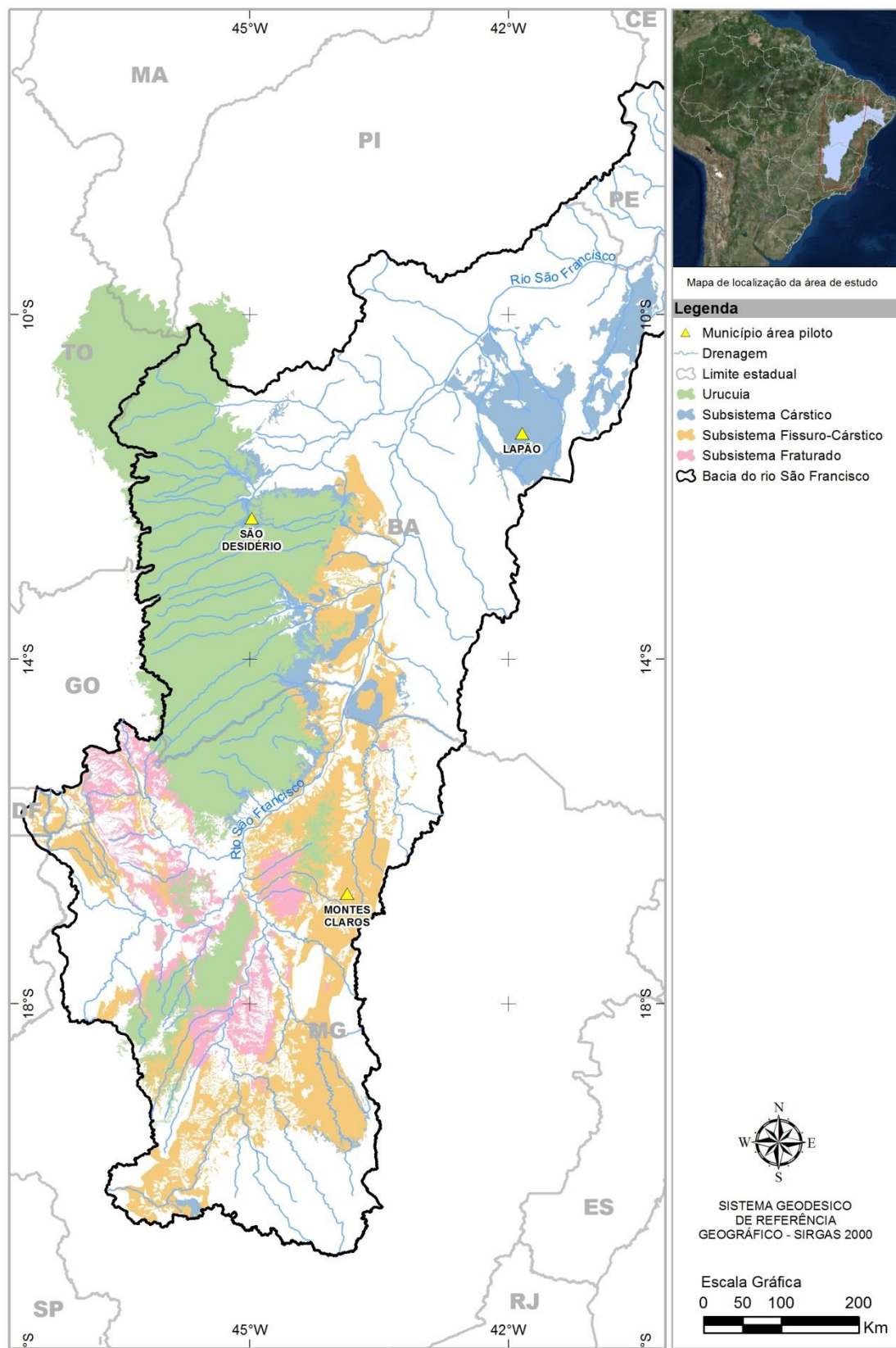


Figura 1: Área de estudo, destacando os sistemas cársticos e fissuro cársticos, e as Áreas Piloto

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 perfilagem ótica e geofísicas.

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

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

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	24
2.	LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS.....	25
2.1	Análise dos dados socioeconômicos.....	25
2.1.1	<i>Metodologia de análise</i>	<i>25</i>
2.1.2	<i>Aspectos socioeconômicos da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira</i>	<i>26</i>
2.1.3	<i>Demanda Hídrica da Área Piloto do Rio do Vieira</i>	<i>34</i>
3.	MEIO FÍSICO	37
3.1	Rede de Drenagem.....	37
3.1.1	<i>Densidade de drenagem</i>	<i>38</i>
3.2	Unidades de solo	42
3.3	Classes de vegetação	43
3.4	Declividade	47
3.5	Geomorfologia.....	51
3.6	Uso e ocupação do solo.....	52
4.	GEOLOGIA	58
4.1	Geologia local	60
4.1.1	<i>Formação Lagoa do Jacaré.....</i>	<i>62</i>
4.1.2	<i>Grupo Urucuia.....</i>	<i>67</i>
4.1.3	<i>Coberturas cenozoicas.....</i>	<i>68</i>
4.2	Mapeamento geológico	68
4.2.1	<i>Geologia estrutural.....</i>	<i>68</i>
4.2.2	<i>Análise do fraturamento</i>	<i>72</i>
4.2.3	<i>Lineamentos estruturais.....</i>	<i>73</i>
4.2.4	<i>Eventos sísmicos em Montes Claros e o sistema de esforços regional.....</i>	<i>75</i>
4.3	Feições cársticas	78
4.3.1	<i>Parque Estadual da Lapa Grande</i>	<i>78</i>
4.3.2	<i>Lagoa da Tiririca</i>	<i>83</i>
4.3.3	<i>Outras estruturas de carstificação.....</i>	<i>84</i>
5.	GEOFÍSICA	86
5.1	Gravimetria	86
5.1.1	<i>Considerações gerais sobre o método gravimétrico.....</i>	<i>88</i>
5.1.2	<i>Modelagem com geometria 2D e 3D.....</i>	<i>91</i>
5.1.3	<i>Resultados obtidos.....</i>	<i>91</i>
5.2	Eletrorresistividade.....	101
5.2.1	<i>Sondagens elétricas.....</i>	<i>103</i>

5.2.2	<i>Caminhamentos elétricos</i>	112
5.2.3	<i>Comentários finais</i>	113
5.3	<i>Perfilagem Óptica e Geofísica</i>	114
6.	HIDROGEOLOGIA	122
6.1	<i>Litologia, estrutura e carstificação</i>	124
6.1.1	<i>Ensaio com traçadores – Aspectos Metodológicos</i>	126
6.1.2	<i>Ensaio com traçadores - Execução</i>	129
6.2	<i>Zoneamento de vazões da área piloto</i>	133
6.3	<i>Parâmetros hidrodinâmicos</i>	135
6.3.1	<i>Metodologia para a análise dos testes de aquífero</i>	135
6.3.2	<i>Testes realizados na área piloto da Bacia do Rio do Vieira</i>	137
6.4	<i>Recargas e exutórios</i>	170
6.4.1	<i>Considerações hidrogeológicas e hidrológicas</i>	172
6.4.2	<i>Procedimentos metodológicos para o cálculo das recargas</i>	177
6.4.3	<i>Resultados de quantificação de recarga</i>	183
6.4.5	<i>Considerações finais</i>	192
6.5	<i>Reservas, recursos e exploração</i>	195
6.5.1	<i>Reservas permanentes</i>	195
6.5.2	<i>Reserva reguladora ou recarga</i>	195
6.5.3	<i>Exploração</i>	198
6.5.4	<i>Síntese da Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos</i>	202
6.6	<i>Exploração na área piloto da Bacia do Rio do Vieira</i>	202
6.6.1	<i>Levantamento e sistematização dos dados</i>	203
6.6.2	<i>Zoneamento do Saldo Hídrico</i>	212
7.	HIDROQUÍMICA	216
7.1	<i>Amostragem de Águas</i>	216
7.1.1	<i>Rede de Amostragem</i>	217
7.1.2	<i>Procedimentos de Coleta</i>	217
7.1.3	<i>Métodos de Análise</i>	221
7.2	<i>Caracterização das Águas</i>	224
7.2.1	<i>Avaliação da distribuição dos dados físico-químicos e químicos</i>	224
7.2.2	<i>Avaliação do efeito sazonal na hidroquímica</i>	232
7.3	<i>Avaliação Hidrogeoquímica</i>	238
7.3.1	<i>Estatística Descritiva</i>	244
7.3.2	<i>Caracterização e distinção dos grupos de poços</i>	255
7.3.3	<i>Fácies hidroquímicas</i>	266
7.3.4	<i>Parâmetros Específicos</i>	272

7.3.5	<i>Qualidade das Águas para o Consumo Humano</i>	274
7.3.6	<i>Fatores controladores do ferro e manganês nas águas</i>	276
7.4	Considerações Finais.....	282
8.	AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE	283
8.1	Classificação a partir do parâmetro: Epicarste (E).....	284
8.2	Classificação a partir do parâmetro: Cobertura de Proteção (P).....	286
8.3	Classificação a partir do parâmetro: Condições de infiltração (I)	288
8.4	Classificação a partir do parâmetro: Grau de desenvolvimento da rede cárstica (K)	290
9.	PERIGO DE CONTAMINAÇÃO	294
11.	A QUESTÃO JAÍBA	297
11.1	Estudo geofísico por eletrorresistividade	298
11.1.1	<i>O Índice de Carstificação</i>	298
11.1.2	<i>Serviços realizados</i>	300
11.1.3	<i>Resultados obtidos</i>	301
11.2	Estudo geofísico por gravimetria	307
12.	CONCLUSÕES	320
13	PROPOSTAS DE GESTÃO	323
14.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	326

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira/MG.	27
Figura 2.2: PIB e PIB per capita do município de Monte Claros - área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (IBGE 2012).	28
Figura 3.1: Mapa de drenagem e corpos de água superficial da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	39
Figura 3.2: Mapa de densidade de drenagem da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	41
Figura 3.3: Unidades de solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	43
Figura 3.4: Mapa das unidades de solo da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	44
Figura 3.5: Mapa das classes de vegetação da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	46
Figura 3.6: Perfil topográfico da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Magalhães <i>et al.</i> , 2012).	47
Figura 3.7: Porcentagem da declividade em relação à área da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	49
Figura 3.8: Mapa de declividade da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	50
Figura 3.9: Porcentagem das unidades geomorfológicas da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	51
Figura 3.10: Mapa geomorfológico da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	53
Figura 3.11: Porcentagem de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	54
Figura 3.12: Mapa de uso e ocupação do solo da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	57
Figura 4.1: Domínios estruturais da área regional de Montes Claros.	59
Figura 4.3: Corte geológico* na região de Montes Claros, mostra duas superfícies altimétricas distintas – Formação Lagoa do Jacaré (calcário) e Formação Lagoa do Jacaré (siltito).	60
Figura 4.2: Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	61
Figura 4.4: Ponto V-212P: A – Calcarenito com marcas de onda; B e C – Estruturas reliquias, estratificação cruzada acanalada e estratificação cruzada tabular, respectivamente. Ponto V-061P: D – Calcita recristalizada.	62
Figura 4.5: Vista em detalhe do afloramento V-077P.	63
Figura 4.6: Vista geral do afloramento V-216P. Calcário maciço, fraturado e com lapiás no topo.	63
Figura 4.7: A – Vista geral do afloramento V-187P, Rodovia BR-135; B – Camadas horizontalizadas com marcas onduladas no topo e na base; C – Estrutura plumosa.	63
Figura 4.8: A, B, C, D – V-205P – Parque Estadual da Lapa Grande. Calcários cinza maciço na base, e calcários laminados e com granodecrescência ascendente para o topo.	64
Figura 4.9: V-212P – A – Vista geral do afloramento; B – Camadas horizontalizadas com marcas de onda na base; C – Marcas de onda (em detalhe); D – Acamamento plano paralelo.	65
Figura 4.10: Formação Lagoa do Jacaré (siltito): A – V-005P; B – V-006P.	66
Figura 4.11: Intercalação calcário/siltito, afloramento V-017.	66
Figura 4.12: A – Vista geral do afloramento V-165; B, C, D – ilustram as estruturas encontradas em campo.	67

Figura 4.13: Seção a leste da área-piloto de Montes Claros mostrando os quartzitos das unidades mais antigas (Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas) jogados por falha de empurrão sobre filitos da unidade mais nova (Grupo Bambuí) (pontos V-08 e 09).	69
Figura 4.14: Metassiltitos do Grupo Bambuí mostrando relação de quase ortogonalidade entre o acamamento sedimentar (S0) e a clivagem ardosiana (S1) (V-006P).	69
Figura 4.15: Falha de empurrão separando duas fácies distintas dos calcários do Grupo Bambuí (BR-135, Ponto V-37).	70
Figura 4.16: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar e eixos de dobras do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).	71
Figura 4.17: Estereograma mostrando os polos de clivagem ardosiana e lineações de estiramento do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).	71
Figura 4.18: Estereograma mostrando as fraturas em rochas do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).	72
Figura 4.19: Diagrama rosácea mostrando a direção das fraturas sub-verticais afetando rochas do Grupo Bambuí.	73
Figura 4.20: Mapa de lineamentos estruturais da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	74
Figura 4.21: Mapa (A) e seção (B) mostrando a sismicidade natural na região de Montes Claros (Agurto-Detzel <i>et al.</i> , 2015).	76
Figura 4.22: Direções principais de esforços máximos compressivos (barras amarelas) na região do Cráton do São Francisco, determinadas pelos mecanismos focais de sismos naturais (Agurto-Detzel <i>et al.</i> , 2015).	77
Figura 4.23: Limites do Parque Estadual da Lapa Grande. (Fonte: IEF/MG).	78
Figura 4.24: Mananciais do Parque da Lapa Grande/MG. (Fonte: IEF/MG)	79
Figura 4.25: A, B, C, D – V-205P – Parque Estadual da Lapa Grande. Calcários cinza maciço na base, e calcários laminados e com granodecrescência ascendente para o topo.	80
Figura 4.26: Exemplares de espeleotemas, Lapa D'Água. (Fonte: Acervo PELG)	80
Figura 4.27: Interior da Lapa D'Água. (Fonte: Marcelo A. Neves)	81
Figura 4.28: Lapa Pintada possui uma forma semicircular e diversas pinturas. (Fonte: Acervo Eduardo Gomes)	81
Figura 4.29: Vista geral da entrada da gruta.	82
Figura 4.30: Lapa do Andorinão, próximo ao distrito de Santa Bárbara. No entorno do PELG.	83
Figura 4.31: Lagoa da Tiririca, distrito de Nova Esperança/MG.	83
Figura 4.32: Mapa de estruturas de carstificação da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	85
Figura 5.1: Posição das estações gravimétricas na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira	87
Figura 5.2: Perfil da derivada horizontal (linha azul em A) e vertical (linha vermelha em B) calculados para o perfil gravimétrico (linha preta em A e B) gerado pelo modelo sintético de uma zona de falha.	90
Figura 5.3: Mapa da Anomalia <i>Bouguer</i> Completa de Montes Claros (MG).	92
Figura 5.4: Mapa de Anomalia <i>Bouguer</i> Regional da região de Montes Claros (MG).	93
Figura 5.5: Mapa de Anomalia <i>Bouguer</i> Residual da região de Montes Claros (MG).	94
Figura 5.6 (A): Mapa de derivadas nas direções E-W.	95
Figura 5.6 (B): Mapa de derivadas nas direções N-S.	96
Figura 5.6 (C): Mapa de derivada Vertical.	97
Figura 5.7: Modelagens 2D e 3D da região de Montes Claros.	98

Figura 5.8: Grupo Chapada Diamantina - possível substrato do Grupo Bambuí em Montes Claros.	100
Figura 5.9: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da região de Montes Claros. O desvio para as profundidades é de ± 100 m.	102
Figura 5.10: Distribuição das SEVs na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	106
Figura 5.11: Zoneamento de resistências transversais na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	110
Figura 5.12: Zoneamento de resistividades aparentes em AB 200 m na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	111
Figura 5.13: Caminhamentos elétricos em Montes Claros.	112
Figura 5.14: Perfil de resistividades A e B em Montes Claros.	113
Figura 5.15 Localização dos poços utilizados para a realização de Perfilagem Óptica e Geofísica.	116
Figura 5.16 Perfilagem óptica no Poço 3100012514. (a) Único poço representativo da Formação Lagoa do Jacaré (Calcário); (b) Comportamento do calcário representando a fácies cinza claro e homogêneo; (c) Fratura aberta concordante ao acamamento; (d) Vista lateral do comportamento das fraturas abertas com padrão comum nos poços perfilados na área de estudo.	118
Figura 5.17 Perfilagem óptica no Poço 310012514. (a) Vista interna da fratura aberta concordante ao acamamento; (b) Outro exemplo do comportamento das fraturas abertas presente nesta fácies; (c) Fácies representando um calcário cinza escuro com ocorrência densa de fraturas preenchidas por calcita do calcário da Formação Lagoa do Jacaré (Calcário); (d) Micro-espaços entre os planos de acamamento.	118
Figura 5.18 Perfilagem óptica no Poço 3100012510. (a) Água turva consequência característica da fácies mais friável observada na Formação Lagoa do Jacaré (Siltito); (b) Comportamento comum das fraturas abertas concordantes ao acamamento; (c) Fratura aberta resultante da interseção com direções distintas com fraturas preenchidas; (d) Vista geral da fácies cinza escuro.	119
Figura 5.19 Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço 3100020692.	120
Figura 5.20 Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço 3100012514.	121
Figura 6.1: Vazão/metro de profundidade x profundidade dos poços captando a Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí.	123
Figura 6.2: Histograma de profundidades dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	124
Figura 6.3: Geologia da região de Montes Claros, segundo Chaves <i>et al.</i> (2011).	125
Figura 6.4 – Mapa de Localização dos Testes de Traçadores	131
Figura 6.5: Zoneamento de vazões na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	134
Figura 6.6: Localização dos 5 conjuntos de poços para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos em Montes Claros/MG.	138
Figura 6.7: Perfil litológico e construtivo do poço CO26 situado no Almoxarifado da COPASA em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100012511). Condutor hidráulico cárstico fissural com entradas de água a 28, 31, 37, 71 e 83 m de profundidade.	139
Figura 6.8: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almoxarifado COPASA em Montes Claros/MG.	140
Figura 6.9: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA (Modelo de Boulton 1963)	141

Figura 6.10: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almoxarifado COPASA em Montes Claros/MG.	142
Figura 6.11: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA em julho de 1996 (Modelo de Boulton 1963).	143
Figura 6.12: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almoxarifado COPASA em Montes Claros - MG testado em março de 2014.	144
Figura 6.13: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA em março de 2014 (Modelo de Boulton 1963).	145
Figura 6.14: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almoxarifado COPASA em Montes Claros - MG testado em março de 2015.	147
Figura 6.15: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA pelo método de superposição de escoamentos usando o (Modelo de Boulton 1963).	148
Figura 6.16: Perfil construtivo do poço CO27 Cristo Rei em Montes Claros/MG. Trata-se de condutor hidráulico cárstico fissural com entradas não indicadas.	149
Figura 6.17: Variação da vazão bombeada com o tempo no teste do poço CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.	150
Figura 6.18 – Água do poço CO27 jorrando espontaneamente ao nível do solo no local indicado pela seta.	151
Figura 6.19: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO27 Bairro Cristo Rei em Montes Claros – MG, testado em março de 2015.	151
Figura 6.20 - Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO27 bombeado no Bairro Cristo Rei em Montes Claros (Modelo de Boulton 1963).	152
Figura 6.21: Perfil litológico e construtivo do poço CO29 Bairro Independência em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100012526). Condutor hidráulico cárstico fissural com profundidades de entradas de água não indicadas.	154
Figura 6.22: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO29 Bairro Independência em Montes Claros/MG, testado em março de 2015.	155
Figura 6.23: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO29 bombeado no Bairro Independência em Montes Claros pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	156
Figura 6.24: Perfil litológico e construtivo do poço CO01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100020692). Condutor hidráulico cárstico fissural com profundidades de entradas de água a 16, 27,5, 74 e 126 m.	158
Figura 6.25: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO01 ETE COPASA em Montes Claros/MG, testado em março de 2015.	159
Figura 6.26: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO01 bombeado na ETE COPASA em Montes Claros pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	160
Figura 6.27: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço E-01 ETE COPASA em Montes Claros, observado em bombeamento simultâneo com o C01 a 207m de distância, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	161
Figura 6.28: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço PZ-01 na ETE COPASA em Montes Claros, observado em bombeamento a 560 m de distância, do poço bombeado CO01 pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	162
Figura 6.29: Perfil litológico e construtivo do poço CO32 bombeado no teste realizado em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros.	163

Figura 6.30: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros Montes Claros/MG, testado em setembro de 1998. ...	164
Figura 6.31: Avaliação dos parâmetros hidráulicos do teste de setembro de 1998 no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	165
Figura 6.32: Variação da vazão bombeada com o tempo no teste do poço CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.....	166
Figura 6.33: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO32 na captação de Rebentão dos Ferros da COPASA em Montes Claros – MG, testado em março de 2015. ...	167
Figura 6.34: Avaliação dos parâmetros hidráulicos do teste de março de 2015 no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.	168
Notar que a significativa alteração da vazão produziu um brusco desvio da curva de campo em relação à curva da função de Boulton.	168
Figura 6.35: Mapa de localização da área piloto do Rio do Vieira diante do contexto geológico regional.....	171
Figura 6.36: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira e da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande	174
Figura 6.37: Mapa de localização da bacia delimitada pela área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	176
Figura 6.38: Hidrograma e suas regiões principais.	178
Figura 6.39: Valor de $-1k$ (retângulo vermelho) a partir da curva exponencial referente ao período de recessão.	179
Figura 6.40: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Colônia do Jaíba (Código ANA 44670000) e da Estação Pluviométrica Colônia do Jaíba (Código ANA 1543002), no ano hidrológico 1995-1996.....	184
Figura 6.41: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Claro dos Poções (Código ANA 42100000).	185
Figura 6.42: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Ponte dos Ciganos (Código ANA 42187000).....	186
Figura 6.43: Mapa proposto para expansão dos limites da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	194
Figura 6.44: Variações pluviométricas e datas das campanhas de medição de níveis estáticos.	196
Figura 6.45: Gradiente hidráulico esquemático na Formação Lagoa do Jacaré.	198
Figura 6.46: Mapa de localização dos poços	199
Figura 6.47: Histograma de vazões da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.....	200
Figura 6.48: Frequências relativas da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	201
Figura 6.49: Frequências acumuladas das vazões da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	201
Figura 6.50: Frequências das classes de profundidade dos poços na Área Piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	204
Figura 6.51: Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	205
Figura 6.52: Frequências das classes de profundidade dos níveis estáticos dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	206

Figura 6.53: Frequências das classes dos níveis dinâmicos dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	207
Figura 6.54: Frequências das classes de vazão dos poços cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	208
Figura 6.55: Distribuição espacial da vazão dos poços produtores na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, em condições de funcionamento.	214
Figura 6.56: Zoneamento dos saldos hídricos do Sistema Aquífero Bambuí na área de Montes Claros.....	215
Figura 7.1 – Localização dos poços amostrados na primeira e segunda campanha na bacia do Rio do Vieira.	218
Figura 7.2 - Sonda e eletrodos para determinação da temperatura, pH e ORP.	219
Figura 7.3 - Leitura dos parâmetros condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.	219
Figura 7.4 - Inserção do eletrodo para leitura dos parâmetros in situ.....	220
Figura 7.5 – Logística de campo envolvendo a medição e anotação dos parâmetros medidos in situ, na surgência do Rebentão dos Ferros (C-056).....	220
Figura 7.6 – Caixa térmica com gelo para acondicionamento e envio das amostras para o laboratório.....	221
Figura 7.7 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.	225
Figura 7.8 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de CE (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).	226
Figura 7.9 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de sódio (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).	226
Figura 7.10 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de cloreto (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).	227
Figura 7.11 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).....	229
Figura 7.12 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).....	229
Figura 7.13 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de sódio (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).....	230
Figura 7.14 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de cloreto (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).....	231
Figura 7.15 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de sulfato (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).....	231
Figura 7.16 – Comparação dos resultados de pH obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.....	232
Figura 7.17 – Comparação dos resultados de temperatura (°C) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	232

Figura 7.18 – Comparação dos resultados de CE ($\mu\text{S/cm}$) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	233
Figura 7.19 – Comparação dos resultados de STD (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	233
Figura 7.20 – Comparação dos resultados de ORP (mV) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	234
Figura 7.21 – Comparação dos resultados de dureza (mg/L como CaCO_3) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	234
Figura 7.22 – Comparação dos resultados de cálcio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	235
Figura 7.23 – Comparação dos resultados de magnésio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	235
Figura 7.24 – Comparação dos resultados de sódio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	236
Figura 7.25 – Comparação dos resultados de potássio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	236
Figura 7.26 – Comparação dos resultados de bicarbonato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	237
Figura 7.27 – Comparação dos resultados de sulfato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	237
Figura 7.28 – Comparação dos resultados de cloreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.	238
Figura 7.29 – Localização das amostras dos grupos 1 e 2 na bacia do Rio do Vieira, com base nos aspectos estruturais e geológicos.	239
Figura 7.30 - Aspectos geomorfológicos e geológicos: poços do Grupo 1, localizados na faixa oeste (Formação Lagoa do Jacaré - calcários), com altitude média é 750 m e poços do Grupo 2, localizados na faixa leste (Formação Lagoa do Jacaré - siltitos) com altitude média de 629 m.	240
Figura 7.31 - Aspectos baseados na diferença de gradiente hidráulico: poços do Grupo 1 estão localizados na faixa oeste, cujo gradiente hidráulico é maior quando comparado aos poços do Grupo 2 localizados na faixa leste.	240
Figura 7.32 - Localização das amostras dos grupos 1 e 2 na bacia do Rio do Vieira, com base nos aspectos de dolinas e cavidades.	241
Figura 7.33 – Localização das amostras dos grupos 1 e 2 na bacia do Rio do Vieira, com base no uso e ocupação do solo e aspectos ambientais.	242
Figura 7.34 - Resultados de dureza (mg/L como CaCO_3) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	248

Figura 7.35 - Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira. ..	248
Figura 7.36 - Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período úmido para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira.	249
Figura 7.37 – Resultados de Dureza (mg/L como CaCO ₃) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	255
Figura 7. 38 - Resultados de STD (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	256
Figura 7.39 - Resultados de STD (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	256
Figura 7.40 - Resultados de pH das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	257
Figura 7.41 - Resultados de pH das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.	257
Figura 7.42 - Resultados de dureza (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	258
Figura 7.43 - Resultados de dureza (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	258
Figura 7.44 - Resultados de Bicarbonato (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	259
Figura 7. 45 - Resultados de Bicarbonato (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	259
Figura 7.46 - Resultados de Cálcio (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	260
Figura 7.47 - Resultados de Cálcio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	260
Figura 7.48 - Resultados de cloreto (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	261
Figura 7.49 - Resultados de Cloreto (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	262
Figura 7.50 – Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira. ..	262
Figura 7.51 - Resultados de Sódio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	263
Figura 7.52 - Resultados de Sódio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	263
Figura 7.53 - Resultados de Nitrato (mg/L N) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	264
Figura 7.54 - Resultados de Nitrato (mg/L N) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	264
Figura 7.55 - Distribuição dos poços na parte urbana de Montes Claros.	265
Figura 7.56 - Resultados de Potássio (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.	266
Figura 7.57 - Resultados de Potássio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.....	266
Figura 7.58 – Diagrama de Piper das amostras dos grupos 1 e 2 coletadas na Bacia do Rio do Vieira no período seco.	267

Figura 7.59 – Diagrama de Piper das amostras dos grupos 1 e 2 coletadas na Bacia do Rio do Vieira no período úmido.	268
Figura 7.60 – Distribuição dos diagramas de Stiff no período seco.	270
Figura 7.61 – Distribuição dos diagramas de Stiff no período úmido.	271
Figura 7.62 - Diagrama Eh-pH com as principais espécies de ferro e manganês, e as amostras coletadas nos períodos seco e úmido plotadas conjuntamente (Figura modificada de Hem, 1986)	277
Figura 7.63 - Teor de ferro nas amostras coletadas nos períodos seco e úmido, na Bacia do Rio do Vieira.	279
Figura 7.64 – Correlação dos teores de ferro e resultados pH, nas amostras coletadas nos períodos seco e úmido, na Bacia do Rio do Vieira.	281
Figura 7.65 – Correlação dos teores de ferro e resultados Eh, nas amostras coletadas nos períodos seco e úmido, na Bacia do Rio do Vieira.	281
Figura 8.1: Parâmetro E – Epicarste.	285
Figura 8.2: Parâmetro P: cobertura de proteção.	287
Figura 8.3: Parâmetro I: condições de infiltração.	289
Figura 8.4: Parâmetro K: grau de desenvolvimento da rede cárstica.	291
Figura 8.5: Classificação da vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	292
Figura 8.6: Mapa de Vulnerabilidade – EPIK Adaptado para a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	293
Figura 9.1: Distribuição das cargas contaminantes na área piloto da Bacia do Rio do Vieira com classificação POSH.	295
Figura 9.2: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	296
Figura 11.1: Cálculo do Índice de Carstificação	299
Figura 11.2: Caminhamentos elétricos realizados em Jaíba.	300
Figura 11.3: Mapa de Resistividades Aparentes em AB=200 metros.	302
Figura 11.4: Mapa do índice de carstificação.	304
Figura 11.5: Zoneamento de vazões em Jaíba	306
Figura 11.7: Mapa da Anomalia Bouguer Completa da área de Jaíba/BA.	309
Figura 11.8: Mapa de Anomalia Bouguer Regional da área de Jaíba/BA.	310
Figura 11.9: Mapa de Anomalia Bouguer Residual da área de Jaíba/BA.	311
Figura 11.10A: Mapa de derivada na direção E-W.	312
Figura 11.10B: Mapa de derivada na direção N-S.	313
Figura 11.10C: Mapa de derivada na direção vertical.	314
Figura 11.11: Modelagens 2D e 3D da região de Jaíba: (A) Localização dos perfis modelados; Seções N-S dos modelos nas coordenadas (B) 607024 m E, (C) 610943 m E, (D) 615147 m E, (E) 619114 m E, (F) 623271 m E, (G) 627285 m E, (H) 631346 m E; E (I) comparação dos perfis modelados 2D com a modelagem 3D.	315
Figura 11.12: Provável falha do São Francisco. Modificado de Iglesias & Uhlein (200.....	318
Figura 11.13: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da área de Jaíba. O desvio para as profundidades é de ± 100 m.	319
Figura 13.1 – Rede de monitoramento proposta para a Bacia do Rio Vieira.	325

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - População, Rendimento, Alfabetização e IDHM na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	26
Tabela 2.2 - Faixas de Desenvolvimento Humano – IDHM.	28
Tabela 2.3 - Formas de Abastecimento de Água para os municípios na área piloto da Bacia do Rio do Vieira.	31
Tabela 2.4 - Formas de Esgotamento Sanitário para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.	31
Tabela 2.5 - Incidência de doenças associadas ao saneamento básico para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.	32
Tabela 2.6 - Destino do Lixo para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.	33
Tabela 2.7 - Fornecimento de Energia Elétrica para a área piloto da bacia do Rio do Vieira.	33
Tabela 2.8 – Demanda Hídrica da área piloto do rio do Vieira (m ³ /dia)	34
Tabela 3.1 – Sub-bacias do Rio do Vieira. Adaptado de Borges (2007).	37
Tabela 3.2 – Classificação da Densidade de Drenagem segundo Carvalho <i>et al.</i> (2006).	38
Tabela 3.3 – Sub-bacias com a densidade de drenagem calculada por Borges (2007).	38
Tabela 3.4 – Classificação da Densidade de Drenagem (Silva <i>et al.</i> 2009).	40
Tabela 3.5 – Área ocupada pelas unidades de solo da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	43
Tabela 3.6 – Área e porcentagem da vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	45
Tabela 3.7 – Quantificação de área e perímetro para as classes de susceptibilidade a erosão na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Magalhães <i>et al.</i> , 2012).	48
Tabela 3.8 – Declividade e área da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	48
Tabela 5.1 – Coordenadas das estações gravimétricas.	88
Tabela 5.2 – Relação das SEVs na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. ...	104
Tabela 5.3 Identificação dos métodos geofísicos aplicados.	114
Tabela 5.4 - Poços utilizados.	115
Tabela 6.1 Rede do Ensaio de Traçadores no Município de Montes Claros, MG.	130
Tabela 6.2 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado Almoxarifado COPASA para D = 1,6582 (vazão constante de 101 L/s) em Montes Claros/MG.	141
Tabela 6.3 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.	141
Tabela 6.4 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA.	143
Tabela 6.5 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.	143
Tabela 6.6 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado C26 Almoxarifado COPASA em março de 2014.	145
Tabela 6.7 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento (março/14) do poço bombeado Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.	146
Tabela 6.8 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA em março de 2014.	147
Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.	148

Tabela 6.10 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO27 no Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.....	152
Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.	153
Tabela 6.12 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO29 no Bairro Independência em Montes Claros/MG.	156
Tabela 6.13 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO29 no Bairro Independência – Montes Claros/MG.....	156
Tabela 6.14 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.....	160
Tabela 6.15 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço CO01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG.	160
Tabela 6.16 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado e bombeando E-01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.	161
Tabela 6.17 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado bombeando E-01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG.	161
Tabela 6.18 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PZ-01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.....	162
Tabela 6.19 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço PZ-01 da ETE COPASA, a 560 m de distância do bombeado em Montes Claros/MG.....	163
Tabela 6.20 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço CO32 bombeado no teste de Rebentão dos Ferros captação da COPASA a 11 km de Montes Claros/MG.....	165
Tabela 6.21 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço CO32 bombeado em setembro de 1998 na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de distância Montes Claros/MG.	165
Tabela 6.22 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço CO32 bombeado no teste de Rebentão dos Ferros captação da COPASA a 11 km de Montes Claros/MG.....	167
Tabela 6.23 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço CO32 bombeado em setembro de 1998 na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de distância Montes Claros/MG.	168
Tabela 6.24 – Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Bambuí (SAB) obtidos em 13 testes de bombeamento, sendo cinco realizados em março de 2015 no âmbito do projeto na área de Montes Claros/MG.	169
Tabela 6.25 – Informações básicas sobre as estações fluviométrica utilizada no cálculo de recarga da área piloto do Rio do Vieira.	172
Tabela 6.26 – Percentuais de distribuição das litologias: Colônia do Jaíba.....	181
Tabela 6.27 - Percentuais de distribuição das litologias: Claro dos Poções.	181
Tabela 6.28 - Percentuais de distribuição das litologias: Ponte dos Ciganos.	182
Tabela 6.29 – Valores de recarga específica para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Colônia do Jaíba.	189
Tabela 6.30 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Claro dos Poções.	190
Tabela 6.31 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Ponte dos Ciganos.	191

Tabela 6.32 – Resultados de recarga encontrados para a área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	193
Tabela 6.33 – Duas campanhas de medição de níveis na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira	196
Tabela 6.35 - Parâmetros estatísticos dos dados de poços da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	203
Tabela 6.36 – Frequência da profundidade dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, IGAM, COPASA e novos poços cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	203
Tabela 6.37 – Frequência dos diâmetros de revestimento dos poços tubulares levantados nos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.	204
Tabela 6.38 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços cadastrados na área da bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	205
Tabela 6.39 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis dinâmicos dos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.	206
Tabela 6.40 – Distribuição de frequência da vazão dos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.	207
Tabela 6.41 – Situação operacional dos 1062 poços catalogados e cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	208
Tabela 6.42 – Estimativa do regime médio de funcionamento previsto para poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	210
Tabela 6.43 - Produção global estimada, explotada na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	211
Tabela 6.44 - Distribuição dos poços em condições de funcionamento na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.	212
Tabela 6.45 – Balanço entre a recarga e as retiradas de água através de poços em. exploração na área piloto de Montes Claros/MG.	213
Tabela 7.1 – Pontos coletados na bacia do Rio do Vieira e respectivos parâmetros analisados.	217
Tabela 7.2 - Parâmetros obtidos in situ e equipamento utilizado.	219
Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise (APHA/AWWA/WEF, 2005).	222
Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise (APHA/AWWA/WEF, 2005) – Continuação.	223
Tabela 7.4 – Resultados de p valor para os testes de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov, nas amostras de água coletadas na bacia do Rio do Vieira no período seco.	224
Tabela 7.5 – Resultados de p valor para os testes de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov, nas amostras de água coletadas na bacia do Rio do Vieira no período úmido.	228
Tabelas 7.6 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período seco (n=7) na Bacia do Rio do Vieira.	245
Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coeficiente de Variação	245
Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período úmido (n=7) na Bacia do Rio do Vieira.	246
Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período úmido (n=7) na Bacia do Rio do Vieira - Continuação.	247
Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coeficiente de Variação	247

Tabela 7.8- Classificação das águas conforme os Sólidos Totais Dissolvidos (McNeely et al., 1979).....	247
Tabela 7.9 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO ₃) (Custódio & Llamas, 1983).	248
Tabelas 7.10 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 2 (período seco n=6) na Bacia do Rio do Vieira.	251
Tabelas 7.11 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 2 (período úmido n=6) na Bacia do Rio do Vieira.	252
Tabela 7.12 – Classificação das águas avaliadas na Bacia do Rio do Vieira.	269
Tabela 7.13 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L).	272
Tabela 7.14 – Pontos de coleta para agroquímicos.	273
Tabela 7.15 – Pontos de coleta para derivados de petróleo.....	274
Tabela 7.16 - 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.....	275
Tabela 7.17 - 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.	276
Tabela 7.18 - Poços amostrados na Bacia do Rio do Vieira, valores de pH, Eh, CO ₂ dissolvido, ferro total e manganês, no período seco.	278
Tabela 7.19 - Poços amostrados na Bacia do Rio do Vieira, valores de pH, Eh, CO ₂ dissolvido, ferro total e manganês, no período úmido.	279
Tabela 9.1 - Classificação do perigo à contaminação.	294
Tabela 11.1 - Coordenadas das estações gravimétricas.....	308
Tabela 12.1 – Síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos.	321
Tabela 13.1 – Coordenadas dos poços de monitoramento da rede proposta para a área piloto do Rio Vieira.....	324

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório constitui o Volume III Tomo 2 do Relatório Final da *“Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos”* que aborda a área piloto do rio do Vieira na região de Montes Claros, no estado de Minas Gerais.

A bacia hidrográfica do rio do Vieira foi escolhida como área piloto devido à intensa exploração de águas subterrâneas que vem ocorrendo para atender à crescente demanda decorrente da concentração demográfica e do desenvolvimento econômico da região

No Capítulo 2 é apresentada uma análise dos aspectos socioeconômicos da área que serviram de base à avaliação das demandas globais de água. Essas demandas são apresentadas para os anos de 2015, 2020, 2025 e 2030, e confrontadas com a evolução histórica da produção de água subterrânea.

O Capítulo 3 constitui uma caracterização física da área piloto, sendo abordados aspectos da drenagem, solos, vegetação e geomorfologia. A geologia é o objeto do Capítulo 4, onde é esboçado um panorama da geologia regional e em seguida é abordada a geologia da área piloto, com ênfase no mapeamento realizado no âmbito do presente estudo.

O Capítulo 5 é dedicado aos estudos geofísicos, realizados através dos métodos gravimétrico e da eletrorresistividade. Inclui ainda uma análise dos resultados obtidos com as perfilações de poço realizadas.

No Capítulo 6 são abordados os aspectos hidrogeológicos da área piloto, onde apresenta-se a caracterização geométrica do aquífero cárstico desenvolvido na Formação Lagoa do Jacaré, seus parâmetros hidrodinâmicos e reservas.

O Capítulo 7 é dedicado à hidroquímica da área piloto, onde são descritos os resultados das duas amostragens realizadas (final do período seco e no final do período chuvoso) e onde são caracterizadas as fácies hidroquímicas. São também avaliadas suas propriedades para consumo humano.

Os capítulos 8 e 9 lidam, respectivamente, com vulnerabilidade e com perigo de contaminação. A primeira é avaliada através da metodologia designada de EPIK adaptado. O segundo é aferido sobrepondo-se o mapa de cargas contaminantes ao mapa de vulnerabilidade.

O Capítulo 10 é dedicado à análise da evolução decenal das cargas hidráulicas da área piloto, obtidas dos poços SIAGAS/CPRM. Essa análise coloca em evidência os comportamentos hidrodinâmicos distintos das formações Lagoa do Jacaré Inferior e Lagoa do Jacaré Superior, enfatizando o papel desta última na recarga do aquífero cárstico da zona urbana de Montes Claros.

Por fim no Capítulo 11 são apresentados estudos realizados no município de Jaíba, próximo a Montes Claros, que apresentou durante os períodos de escassez de chuvas no âmbito da realização do presente estudo, sumidouros na calha do Rio Verde Grande, que corta o município. Foram realizados estudos geofísicos de eletroresistividade e gravimetria, para um melhor entendimento da dinâmica hídrica da região.

2. LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A bacia hidrográfica do rio do Vieira está localizada na mesorregião do norte do estado de Minas Gerais, na região hidrográfica do Verde Grande. O rio do Vieira tem sua nascente principal na Fazenda dos Vieiras, segmento da Serra do Ibituruna, como mostra a Figura 2.1.

A bacia hidrográfica do rio do Vieira está totalmente inserida no município de Montes Claros, com 579,16 km² ocupa pouco mais de 16% da área total do município que é de 3.581 km².

2.1 Análise dos dados socioeconômicos

2.1.1 Metodologia de análise

Com objetivo da caracterização socioeconômica da área piloto do rio do Vieira, foram levantados dados acerca da população residente, rendimento, taxa de alfabetização, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM, PIB, formas de abastecimento de água, existência de banheiro ou sanitário, esgotamento sanitário, destino do lixo e existência de energia elétrica dos municípios inclusos nesta área de estudo. Esses dados foram obtidos, para o ano de 2010, do SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática, na página virtual do Ministério da Saúde, e do Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil.

Foram também obtidas e analisadas informações a respeito da incidência de doenças de veiculação hídrica na região, visando a relacionar a recorrência de tais doenças à carência de infraestruturas de saneamento. Essas informações foram obtidas da página virtual do Ministério da Saúde, sendo as mais recentes referentes ao ano de 2012. As doenças de veiculação hídrica contempladas foram cólera, dengue, febre tifoide, leptospirose, hepatite A e esquistossomose.

Para a caracterização do grau de desenvolvimento do município de Montes Claros, buscaram-se dados alusivos ao IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal. Este índice, variando de 0 a 1, representa uma medida composta por três dimensões do desenvolvimento humano: longevidade, educação e renda. Assim, foi utilizado como base o Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil, uma plataforma de consulta ao Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM.

2.1.2 Aspectos socioeconômicos da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira

2.1.2.1 Análise do IDHM

As três importantes variáveis que condicionam o IDHM foram abordadas: longevidade, renda e educação (Tabela 2.1). Esse índice varia entre 0 e 1, ou seja, quanto mais próximo a 1 maior o desenvolvimento da região. Considerou-se, na avaliação do IDHM, o rendimento nominal médio mensal das pessoas de 10 anos ou mais. Para a taxa de alfabetização, considerou-se a porcentagem da população acima de 10 anos que possui domínio de escrita e leitura.

O valor do IDHM, portanto, reflete a expectativa de vida da população, seu acesso ao conhecimento e seu padrão de vida básico, representado pela renda. Assim, a qualidade de vida inferida através deste índice traduzirá a qualidade de vida do município em estudo.

Tabela 2.1 - População, Rendimento, Alfabetização e IDHM na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

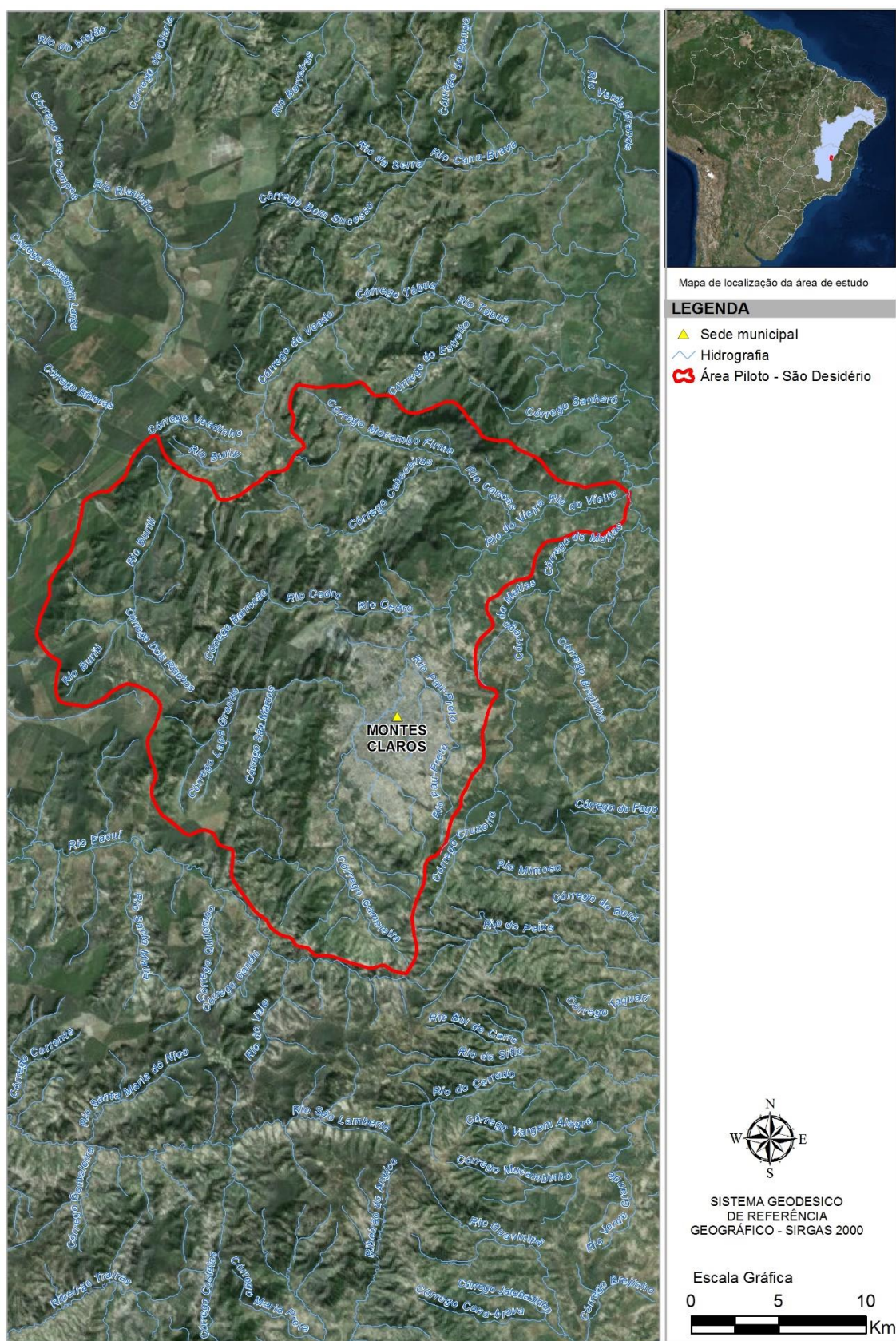
Município	População			Rendimento (R\$)	Alfabetização (%)	IDHM
	Urbana	Rural	Total			
Montes Claros	344.427	17.488	361.915	R\$ 1.040,01	94,2%	0,770
Estado						
Minas Gerais	16.715.216	2.882.114	19.597.330	R\$ 1.101,56	92,3%	0,731

A maior parte da população do município de Montes Claros (95%) reside em área urbana. Montes Claros se destaca entre as dez maiores cidades mineiras com menor índice de desemprego, o que evidencia o possível crescimento do rendimento na região. Este município se destaca em investimentos e em geração de emprego e renda. Logo, uma explicação para o baixo rendimento mensal da população, é que parte da população é flutuante, constituída de universitários das várias instituições de ensino superior presentes na cidade, os quais vivem com menor rendimento que adultos formados.

Os dados da Tabela 2.1 mostram o alto índice de alfabetização (94%) da população. Nos últimos anos o município se transformou em um importante centro universitário, consequência do alto nível de alfabetização, que atrai estudantes de várias partes do país para suas 13 instituições de ensino superior, além dos *campi* das universidades Federal e Estadual.

Ao analisar a correlação educação x rendimento, verifica-se que pessoas de maior escolaridade tendem a atingir maior produtividade e se apropriarem de uma parcela maior do crescimento econômico da região. Assim, elevados rendimentos são compatíveis com uma população com maior grau de escolaridade.

Ao elevar a atratividade do município para os jovens, através do aumento das perspectivas destes em relação à região, há também uma maior retenção de pessoal qualificado e, conseqüentemente, incremento no rendimento nominal médio.



A cidade de Montes Claros tem IDHM maior que o de Minas Gerais. Na Tabela 2.2 verifica-se, com efeito, que o IDHM de Montes Claros (0,77) a põe na categoria de alto desenvolvimento humano, onde também se situa o estado como um todo.

Tabela 2.2 - Faixas de Desenvolvimento Humano – IDHM.

Faixas de Desenvolvimento Humano	
0,000 - 0,499	Muito baixo Desenvolvimento Humano
0,500 - 0,599	Baixo Desenvolvimento Humano
0,600 - 0,699	Médio Desenvolvimento Humano
0,700 - 0,799	Alto Desenvolvimento Humano
0,800 - 1	Muito alto Desenvolvimento Humano

2.1.2.2 Análise do PIB

Os dados sobre o Produto Interno Bruto per capita (PIB) foram obtidos do site do IBGE 2012.

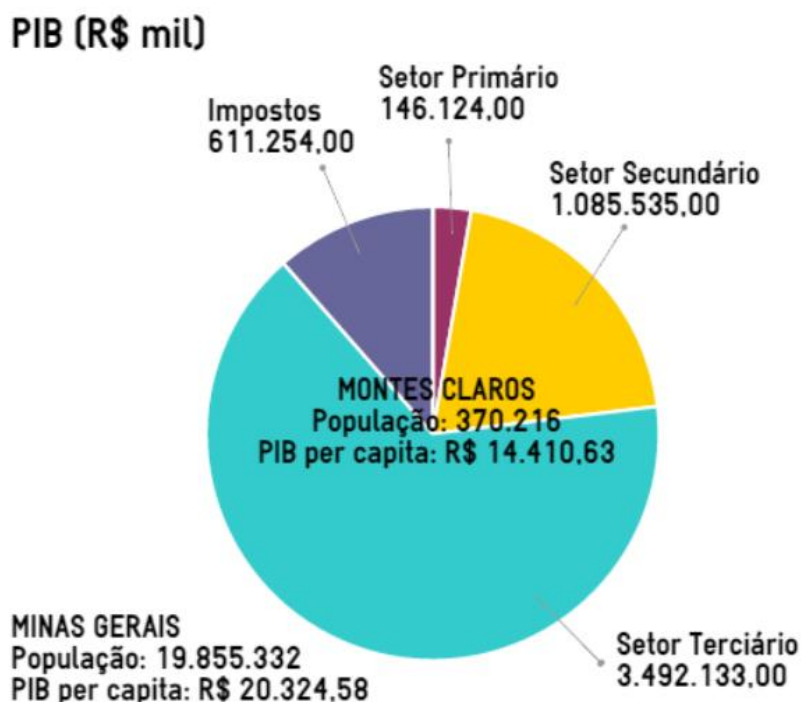


Figura 2.2: PIB e PIB per capita do município de Monte Claros - área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (IBGE 2012).

Verifica-se, na Figura 2.2, que os maiores valores do PIB de Montes Claros são referentes ao setor secundário, que equivale a 20% do PIB total, e ao setor terciário, equivalente a 65% do PIB total, para o ano de 2012. Entretanto, a agropecuária, que já foi a principal atividade do município, ainda representa uma fatia importante na economia. O PIB per capita da região equivale a 71% do PIB per capita do estado.

Como destacado anteriormente, o elevado índice de desenvolvimento verificado para a região de estudo é fruto de sua intensa industrialização e principalmente do comércio. As *commodities* agrícolas representam apenas 3%

da produção, segundo dados do IBGE de 2013. Os setores secundário e terciário possuem índices notavelmente mais relevantes.

A região está localizada na área de jurisdição da antiga Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), e por isso recebeu durante muitos anos incentivos dos Governos Federal, Estadual e Municipal. O setor industrial alcançou um impulso maior a partir de 1965 com a chegada da energia elétrica da CEMIG. As indústrias instaladas são consolidadas, destacando-se a maior fábrica de leite condensado do mundo (Nestlé), uma das três fábricas de insulina na América Latina (NOVONORDISK), a fábrica têxtil (COTENOR), e a quinta maior fábrica de cimento do Brasil (LAFARGE).

Todavia, é o setor terciário que domina o PIB do município, sendo assim classificado como atividade chave. Nesta classificação em específico, a elevada concentração de atividades varejistas e de prestação de serviços teve como base não apenas o ambiente propício às indústrias, mas também o forte impulso do governo devido ao fácil acesso. Um dos fatores que contribuiu para esse crescimento é a localização privilegiada da cidade. O Plano Rodoviário Nacional, com efeito, classificou Monte Claros como o segundo maior entroncamento rodoviário do país, ou seja, liga as regiões Nordeste e Sudeste, devido ao fácil acesso por rodovias.

Durante os últimos anos notou-se o maior crescimento do setor terciário devido ao aumento no investimento em micros e pequenas empresas, principalmente o metalomecânico, responsável pela manutenção de veículos e outros, alimentos, como as panificadoras, e também o setor de móveis, como as marcenarias.

No entanto, a situação de elevado PIB *per capita* pode estar condicionada a concentrações de renda entre a população, não deixando transparecer existência de segmentos sociais com precárias condições de vida.

Dessa maneira, é possível inferir que, apesar de elevada produtividade média na área piloto e elevados índices de rendimento médio, alfabetização e IDHM, é necessária a realização de um estudo mais aprofundado identificando a parcela da população, mesmo que pequena, que ainda tem condições precárias de sobrevivência, a fim de mitigar todos os problemas. A área observada é receptiva a novos investimentos que a façam crescer ainda, e aos municípios em seu entorno.

2.1.2.3 Análise do abastecimento de água

Como citado anteriormente, 20% da atividade econômica da região são voltados ao setor secundário que é responsável por 22% do consumo de água no mundo. Dependendo do ramo industrial e da tecnologia adotada, além do alto consumo necessário para a produção, a água resultante dos processos industriais pode carregar resíduos tóxicos, como metais pesados e restos de materiais em decomposição contaminando as águas superficiais e subterrâneas. Adicionalmente, sendo Montes Claros uma cidade em acelerado desenvolvimento, existe alto consumo de água para a realização de obras de infraestrutura.

Consideram-se abastecidos de água tratada os domicílios ou comunidades que recebem o líquido distribuído por uma rede de abastecimento. As demais

origens da água constituem fontes alternativas, sendo as mais comuns os poços ou nascentes, rio, açudes, lagos ou igarapés, e outros. O IBGE classifica as fontes de abastecimento, em Montes Claros, conforme mostrado na Tabela 2.3.

O município de Montes Claros, com um total de 104.028 domicílios, tem 91% destes abastecidos pela rede geral. Logo, pode-se notar que a maior parte da população conta com abastecimento adequado de água. Assim, apenas uma pequena parcela da população é atendida por poços, rios, açudes, lagos e até mesmo por outras formas não identificadas. Essa parcela está exposta a riscos sanitários, uma vez que recursos hídricos de origem duvidosa podem funcionar como meio de veiculação de doenças.

2.1.2.4 Análise do saneamento básico

Análogo ao retratado anteriormente, foi avaliada a situação do município quanto ao esgotamento sanitário. Os esgotos se caracterizam por conterem alta concentração orgânica, possuindo elevada capacidade de contaminar o meio ambiente e propiciar a proliferação de doenças. É importante, portanto, que os mesmos sejam tratados e tenham destinação segura.

Verificou-se, na zona urbana de Montes Claros, que o manejo de efluentes domésticos admite quatro tipos: rede geral, rede pluvial, fossas sépticas e outros, não identificados. Apenas os três primeiros tipos são submetidos a algum tipo de tratamento. Esses tipos são quantificados na Tabela 2.4. Nessa tabela os casos com tratamento via rede geral, pluvial e fossa séptica são quantificados na coluna (A1+B1). As colunas A2 e B2 quantificam outras formas de esgotamento sanitário que não as citadas anteriormente. As demais colunas incluem casos onde não há banheiro nem sanitário.

A análise da Tabela 2.4, sugere um baixo nível de tratamento de esgoto para a área em geral. Parte considerável do esgoto, com efeito, é descartado diretamente em valões, córregos, rios, praias, dentre outros. A esse procedimento podem ser atribuídos os muitos casos de contaminações e comprometimento da saúde da população da região.

Tabela 2.3 - Formas de Abastecimento de Água para os municípios na área piloto da Bacia do Rio do Vieira.

Município	Forma de Abastecimento de Água							
	Total	Rede geral	Poço/nascente na propriedade	Poço/nascente fora da propriedade	Rio/açude, lago/igarapé	Poço/nascente na aldeia	Poço/nascente fora da aldeia	Outra
Montes Claros	104.028	95.022	3.855	4.042	571	-	-	538
(%)	100,00	91,34	3,71	3,89	0,55	-	-	0,52
Estado								
Minas Gerais	6.028.223	5.200.911	501.492	237.349	46.354	708	200	41.209
(%)	100,00	86,28	8,32	3,94	0,77	0,01	0,00	0,68

Tabela 2.4 - Formas de Esgotamento Sanitário para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.

Município	Existência de Banheiro ou Sanitário e Esgotamento Sanitário							
	Total	Tinham banheiro (A1+A2)	A1	A2	Tinham sanitário (B1+B2)	B1	B2	Não tinham banheiro nem sanitário
Montes Claros	104.028	101.028	95.147	5.881	2.224	1.647	577	776
(%)	100	97,12	94,18	5,82	2,14	74,06	25,94	0,75
Estado								
Minas Gerais	6.028.223	5.862.312	4.701.155	1.161.157	90.183	37.541	52.642	75.728
(%)	100	97,25	80,19	19,81	1,50%	41,63	58,37	1,26

Foram buscadas, junto ao portal do Ministério da Saúde, informações quanto à incidência das doenças atribuídas à falta de saneamento básico. Assim, foram obtidos dados de recorrência das doenças em todo o estado de Minas Gerais e no município Montes Claros. O resultado obtido segue na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Incidência de doenças associadas ao saneamento básico para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.

Município	Incidência de doenças associadas ao saneamento básico por 100.000 habitantes para o período de 2012					
	Esquistossomose	Leptospirose	Cólera	Febre Tifoide	Dengue	Hepatite A
Montes Claros	0,30	0,30	-	-	246,10	0,30
Estado						
Minas Gerais	39.269,10	442,80	-	-	93.692,50	1.476,10
Proporções						
Área Piloto	0,08	0,08	-	-	68,00	0,08
Estado	200,38	2,26	-	-	478,09	7,53

Sabendo que a população da área piloto, em 2010, contemplava 361.915 habitantes, enquanto que Minas Gerais possuía 19.597.330 habitantes, a proporção dada acima é da incidência das ditas doenças normalizadas por sua respectiva população.

No caso da esquistossomose, leptospirose e hepatite A, tem-se que a proporção na área piloto é bastante inferior à proporção no estado de Minas Gerais. A doença que possui maiores índices é a dengue, que é um dos principais problemas de saúde pública no mundo, transmitida pelo mosquito *Aedes aegypti*.

2.1.2.5 Análise da destinação do lixo

O município de Montes Claros, frente ao estado como um todo, detém um alto índice de coleta de resíduos sólidos, efetuada por serviços de limpeza. Resta, entretanto, cerca de 6% dos resíduos com coleta e destinação desconhecidas. A destinação do lixo é mostrada na Tabela 2.6, onde ficam caracterizadas duas categorias: lixo coletado; e outros destinos.

A prefeitura de Montes Claros providenciou o início dos serviços para a coleta e destinação final adequada, em aterro sanitário, dos resíduos sólidos coletados no município. O aterro segue as exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída em 2010. O empreendimento não só é importante para Montes Claros, mas também para vários municípios do seu entorno que serão beneficiados pela Central de Tratamento de Resíduos com uma das tecnologias mais modernas da América Latina.

Tabela 2.6 - Destino do Lixo para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.

Município	Destino do Lixo				
	Total	Coletado	Coletado por serviço de limpeza	Coletado em caçamba de serviço de limpeza	Outro destino
Montes Claros	104.028	97.954	96.840	1.114	6.074
(%)	100,00	94,16	98,86	1,14	5,84
Estado					
Minas Gerais	6.028.223	5.282.287	5.039.259	243.028	745.936
(%)	100,00	87,63	95,40	4,60	12,37

2.1.2.6 Fornecimento de energia elétrica

Avaliemos agora o município de Montes Claros pela quantidade de domicílios atendidos por energia elétrica, que é um fator indispensável para o bem-estar e para o crescimento econômico.

Tabela 2.7 - Fornecimento de Energia Elétrica para a área piloto da bacia do Rio do Vieira.

Município	Existência de Energia Elétrica		
	Total	Tinham	Não tinham
Montes Claros	104.028	103.555	473
(%)	100	99,55	0,45
Estado			
Minas Gerais	6.028.223	5.985.392	42.831
(%)	100	99,29	0,71

Observa-se na Tabela 2.7 que o município tem 99,55% dos domicílios atendidos por energia elétrica. Deste cenário pode-se deduzir que, no que tange ao desenvolvimento das atividades humanas e melhoria da qualidade de vida dos cidadãos, na área piloto do rio do Vieira, o acesso à energia elétrica não constitui um fator comprometedor. Dessa forma, a boa distribuição elétrica nessa região pode estar relacionada aos bons índices socioeconômicos conseguidos em tal município, como foi possível verificar nos itens anteriores.

Assim, melhorias na qualidade da produção e aumento da capacidade produtiva, maiores facilidades quanto ao acesso à informação, extensão ao acesso à educação através da possibilidade de turnos noturnos nas redes de ensino e facilidades para alimentação devido ao armazenamento dos alimentos em ambiente refrigerado representam apenas alguns dos benefícios proporcionados pela disponibilidade farta de energia elétrica na área.

2.1.3 Demanda Hídrica da Área Piloto do Rio do Vieira

Foram avaliadas as demandas hídricas globais da área piloto do rio do Vieira, envolvendo abastecimento humano, consumo industrial, dessedentação animal e irrigação. Os dados necessários para a realização da análise foram obtidos junto ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Na avaliação das demandas atuais, os seguintes consumos foram considerados:

- População urbana e rural- Foram coletados dados oficiais do IBGE dos anos de 2000 e 2010, e posteriormente calculou-se a taxa de crescimento anual entre esses anos.
- Dessedentação animal - Foi feita uma projeção admitindo uma taxa de crescimento linear com base nos dados de 1996 e 2006. Para Minas Gerais tem-se uma taxa de 0,13%.
- Irrigação - Para estimativa da demanda hídrica na irrigação foram utilizadas como bases as áreas irrigadas totais dos anos de 1996 e 2006 (IBGE 2015), e uma demanda unitária de 0,4 L/s.ha (ANA 2007). Tendo como base a área irrigada de 2006, foi aplicada a taxa de crescimento linear observada para a região, com o propósito de obter as projeções das áreas irrigadas nos anos seguintes. As demandas para irrigação foram obtidas a partir da multiplicação da área irrigada pelo coeficiente de demanda unitário de 0,4 L/s/ha e posteriormente transformados na unidade de m³/dia.
- Indústria - O setor industrial, diretamente relacionado ao desenvolvimento econômico da região, é responsável por uma considerável parcela de consumo dos recursos hídricos, com demanda diretamente proporcional ao seu crescimento. A metodologia para estimar o consumo de água nas indústrias da região foi baseada na metodologia da ONS.

As demandas hídricas futuras consistiram na projeção dos dados obtidos para o ano de 2010, expostos no item referente à demanda hídrica atual, de acordo com a metodologia para cada atividade consuntiva analisada. A avaliação foi feita a cada cinco anos entre 2015 e 2030. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.8 abaixo.

Tabela 2.8 – Demanda Hídrica da área piloto do rio do Vieira (m³/dia)

Usos Consuntivos	2015	2020	2025	2030
Abastecimento Humano	139.147,00	145.007,00	149.480,00	152.486,00
Industrial	63,00	75,00	90,00	108,00
Dessedentação Animal	6.589,00	6.637,00	6.684,00	6.732,00
Agricultura	42.376,00	34.525,00	28.129,00,	22.918,00
TOTAL	188.175,00	186.244,00	184.383,00	182.244,00

Ocorre, no entanto, que devido à diferença na base territorial relativa aos municípios emancipados entre os anos de 1996 e 2006, bem como a falta de uniformidade quanto às metodologias de irrigação nesse período, optou-se por aplicar um procedimento estatístico de controle de distorções dos resultados. Tal procedimento consiste em considerar taxas máximas de projeção em 5% a.a e -5% a.a. Dessa forma, as dificuldades na uniformização dos dados, relatadas anteriormente, estariam sendo contornadas, buscando evitar a obtenção de valores discrepantes.

A metodologia para estimar o uso da água nas indústrias brasileiras fundamentou-se na metodologia do ONS. Nesse sentido, realizou-se um levantamento de dados do PIB secundário 2012 e do PIB secundário 2002 dos municípios estudados, com o intuito de obter a taxa de crescimento anual durante esse intervalo de tempo. Para que tais valores sejam passíveis de contraste, o valor do PIB 2012 foi trazido a valores de 2002 através da inflação acumulada no período, considerada como 1,766.

Posteriormente, os dois PIBs foram convertidos em dólar, considerando a paridade do poder de compra (PPC) de R\$/US\$ 0,802 para o ano de 2002, calculada pelo sítio da Quandl. O valor do PIB em dólar foi multiplicado por um coeficiente de demanda anual, conforme anteriormente, equivalente a 0,02713 m³/US\$, através do qual pôde ser obtida a demanda hídrica industrial por ano.

Por fim, a estimativa da demanda hídrica para dessedentação animal tomou como base os censos agropecuários de 1996 e 2006 divulgados pelo IBGE no que se refere ao número efetivo de bovinos, bubalinos, equinos, asininos, muares, caprinos, ovinos, suínos e aves.

O comportamento atípico da área piloto do Rio do Vieira, no que diz respeito à evolução das demandas, encontra explicação no desenvolvimento econômico do município de Montes Claros. As demandas para agricultura têm, geralmente, uma participação muito significativa nas demandas totais. No caso de Montes Claros, áreas anteriormente destinadas à atividade agrícola foram aos poucos sendo tomadas pela urbanização descentralizada que ocorreu no município. Em consequência, as demandas de água para fins agrícolas foram caindo rapidamente na medida em que o desenvolvimento da região foi sendo cada vez mais atrelado aos setores secundários e terciários. Nos municípios vizinhos pode ser observada a atividade agrícola ainda bem expressiva, com o desenvolvimento de extensos bananais ao longo do rio Verde Grande.

Não obstante o crescimento das demandas para os demais usos consuntivos (Tabela 2.8), o desaceleramento da agricultura irrigada resultou, após análise econômica da área, na redução da demanda global projetada.

Na Figura 2.3 mostra-se a evolução anual das demandas globais na área piloto do rio do Vieira (tracejado em azul), conforme dados da Tabela 2.8. Observa-se que essa evolução se dá de acordo com uma lei linear. Mostra-se também, na mesma figura, a evolução das descargas anuais de água subterrânea (tracejado em vermelho), para o regime de 5,2 horas por dia.

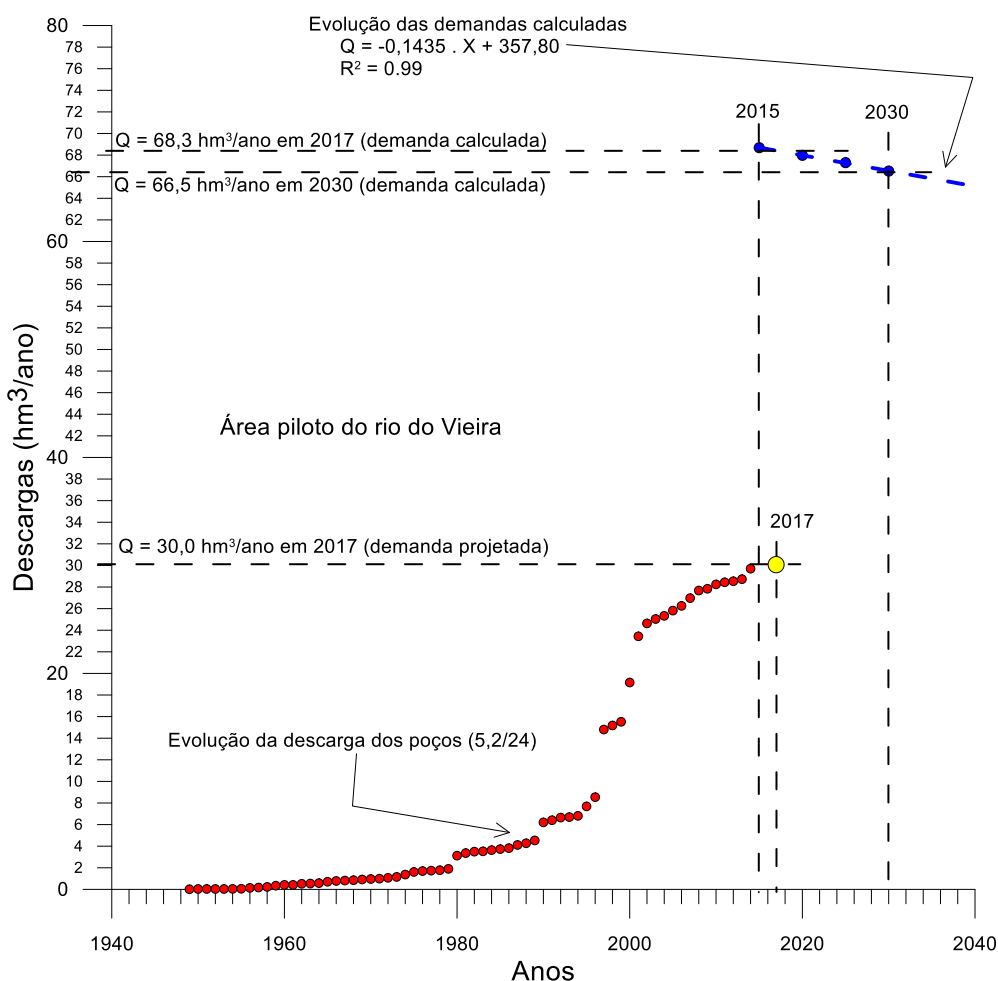


Figura 2.3: Evolução das demandas globais e da produção de água subterrânea

A análise da Figura 2.3 admite os seguintes comentários:

- A evolução histórica da produção de água subterrânea (curva em vermelho) evidencia, já a partir de 2004, uma atenuação da sua taxa de crescimento. Esse comportamento aparenta ser compatível com a redução das demandas, acima discutida.
- A projeção das demandas calculadas aponta para uma descarga da ordem de 66,5 hm³/ano em 2030.
- Em 2015 a demanda calculada seria de 68,3 hm³/ano.
- Em 2017 os poços estariam produzindo cerca de 30 hm³/ano no regime 5,2/24 (Figura 2.3). Esta seria a contribuição da água subterrânea no atendimento da demanda da área piloto de Montes Claros.

Os resultados acima, entretanto, não concordam com informações obtidas de Souza (2013). Segundo esse autor, o abastecimento público de Montes Claros, provido pela Copasa, utiliza três sistemas produtores que fornecem, juntos, uma vazão máxima de 18,0 hm³/ano. O principal sistema é o de Juramento formado pelos rios Juramento, Saracura e Canoas, produzindo 17,15 hm³/ano. O segundo sistema é o de Morrinhos, localizado no Km 5 da BR-365, em Montes Claros, produzindo cerca de 0,73,0 hm³/ano. O terceiro sistema é

constituído de 4 poços tubulares da Copasa, produzindo uma descarga de apenas 0,16 h

Segundo a COPASA a demanda de Montes Claros é de 28,00 hm³/ano. Assim, a capacidade de produção dos três sistemas de água de superfície acima indicada (18,0 hm³/ano) não é suficiente para um pleno abastecimento atual da cidade de Montes Claros o que gerou rodízio no abastecimento além da perfuração de poços profundos e do apoio de caminhões-pipa.

3. MEIO FISICO

3.1 Rede de Drenagem

O Rio do Vieira apresenta nascente principal localizada na Fazenda dos Vieiras, aproximadamente a oito quilômetros da cidade de Montes Claros, tendo como principais afluentes os córregos Vargem Grande, Barroca I e II, Pai João, Gameleira, Lages, do Cedro, Cercado, São Geraldo, Candeias, Barroão, Canoas, do Morcego, Palmital, dos Porcos e os subafluentes: Córregos Bicano e Mangues, Melancias, Cintra, Lapa Grande, Cabeceiras e Mocambo Firme.

O Rio do Vieira e seus afluentes são receptores de intensa carga de dejetos do esgoto urbano tanto domiciliar quanto industrial da cidade de Montes Claros, comprometendo a qualidade das suas águas e alterando a paisagem. Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande (2010), o Rio do Vieira é considerado de classe 2 da nascente até o Córrego São Geraldo e de classe 4 a partir desse córrego. Na Tabela 3.1 estão apresentadas as sub-bacias do Rio do Vieira e informações sobre extensão e área.

Tabela 3.1 – Sub-bacias do Rio do Vieira. Adaptado de Borges (2007).

Sub-bacias do Rio do Vieira	Área (km ²)	Perímetro (km)	Extensão dos cursos de água (km)
Rio Canoas	126,6	70,25	58,51
Rio do Cedro	93,08	63,96	33,87
Córrego dos Bois	94,24	51,82	37,98
Córrego do Palmital	28,26	24,47	5,12
Córrego dos Porcos	7,03	13,06	3,37
Córrego Gameleiras	24,41	22,33	19,96
Córrego São Geraldo	15,14	21,44	10,25
Córrego Vargem Grande	24,35	22,98	12,00
Córrego do Cintra	68,26	69,09	27,73

3.1.1 Densidade de drenagem

Reconhecida como um importante parâmetro para análise de definição das características de uma bacia hidrográfica, a densidade de drenagem foi definida por Horton (1945) como o comprimento médio de rios de uma bacia hidrográfica por unidade de área, podendo ser expressa pela equação que relaciona o comprimento de cursos d'água e a área definida para estudo.

Equação 3.1

$$Dd = \frac{\sum L}{A}$$

Os resultados dessa fórmula são classificados com os critérios apresentados na Tabela 3.2.

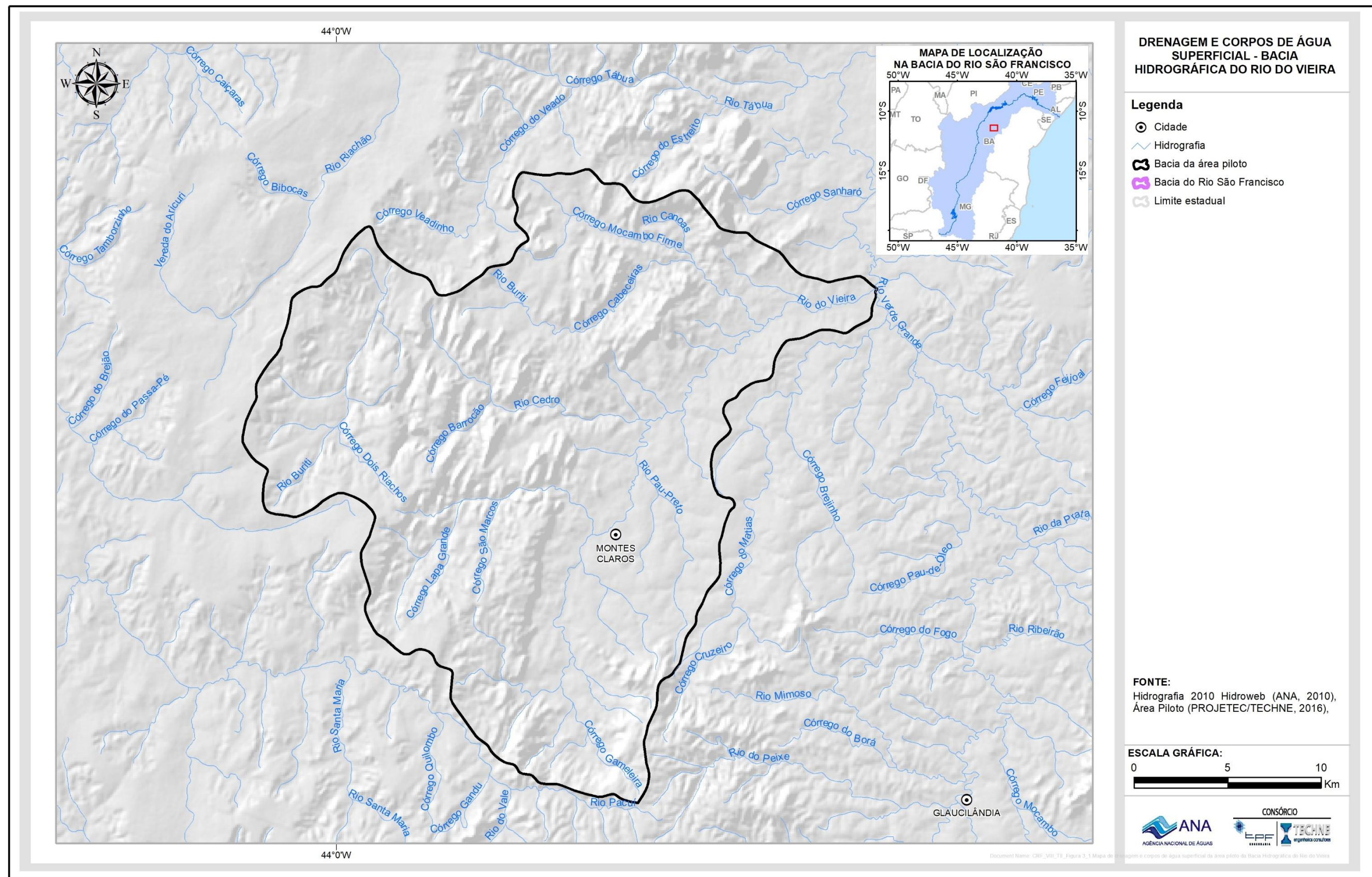
Tabela 3.2 – Classificação da Densidade de Drenagem segundo Carvalho *et al.* (2006).

Classe	Densidade de Drenagem (km/km ²)
Bacias com drenagem pobre	$Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$
Bacias com drenagem regular	$0,5 \leq Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$
Bacias com drenagem boa	$1,5 \leq Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$
Bacias com drenagem muito boa	$2,5 \leq Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$
Bacias excepcionalmente bem drenadas	$Dd \geq 3,5 \text{ Km/Km}^2$

Borges (2007) subdividiu a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira em 9 sub-bacias detalhando as áreas, perímetros, extensões e cursos de água. Com os valores listados foi possível chegar a um valor de densidade de drenagem para os vários pontos da bacia, como se vê na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Sub-bacias com a densidade de drenagem calculada por Borges (2007).

Sub-bacias (Rio do Vieira)	Densidade de Drenagem (km/km ²)
Rio Canoas	0,462
Rio Cedro	0,364
Córrego dos Bois	0,403
Córrego Palmital	0,181
Córrego dos Porcos	0,479
Córrego Gameleiras	0,818
Córrego São Geraldo	0,677
Córrego Vargem Grande	0,493
Córrego do Cintra	0,406



Sendo assim, a partir da classificação de Carvalho *et al.* (2006) se vê que existe uma predominância de sub-bacias com baixa densidade de drenagem, ou seja, bacias com drenagem pobre na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. De acordo com Silva *et al.* (2009), embora pareça uma simples equação, quando aliada os outros parâmetros morfométricos e ocorrência de determinados processos naturais pode levar aos significativos resultados sobre a geomorfologia da região.

Com base na Figura 3.2 compara-se com a geomorfologia da bacia e percebe-se a forte relação com a drenagem da região. Onde encontramos as Chapadas do Rio São Francisco se tem uma diminuição do parâmetro de densidade de drenagem, pois as massas de água são bem espaçadas devido às elevadas altitudes encontradas nessa região. Portanto, define-se a partir da metodologia de Silverman (1986) e melhor definida por Silva *et al.* (2009), que a parte oeste da área apresenta baixíssima densidade de drenagem.

Justamente na parte central da área em estudo percebe-se um aumento da densidade de drenagem seguindo na direção leste, onde é percebida uma grande concentração de riachos e rios, elevando bastante o parâmetro de densidade de rios por quilômetro quadrado quando comparados com o lado oeste. A espacialização exibe em planta a distribuição de valores por meio de isolinhas e assim poder classificar os parâmetros segundo a Tabela 3.4 abaixo.

Como resultado tem-se, na totalidade da área em estudo, uma bacia com drenagem pobre ou com baixa densidade de drenagem.

Tabela 3.4 – Classificação da Densidade de Drenagem (Silva *et al.* 2009).

Classe	Densidade de Drenagem
Baixa	0 – 64
Média	64 – 102
Alta	102 – 176

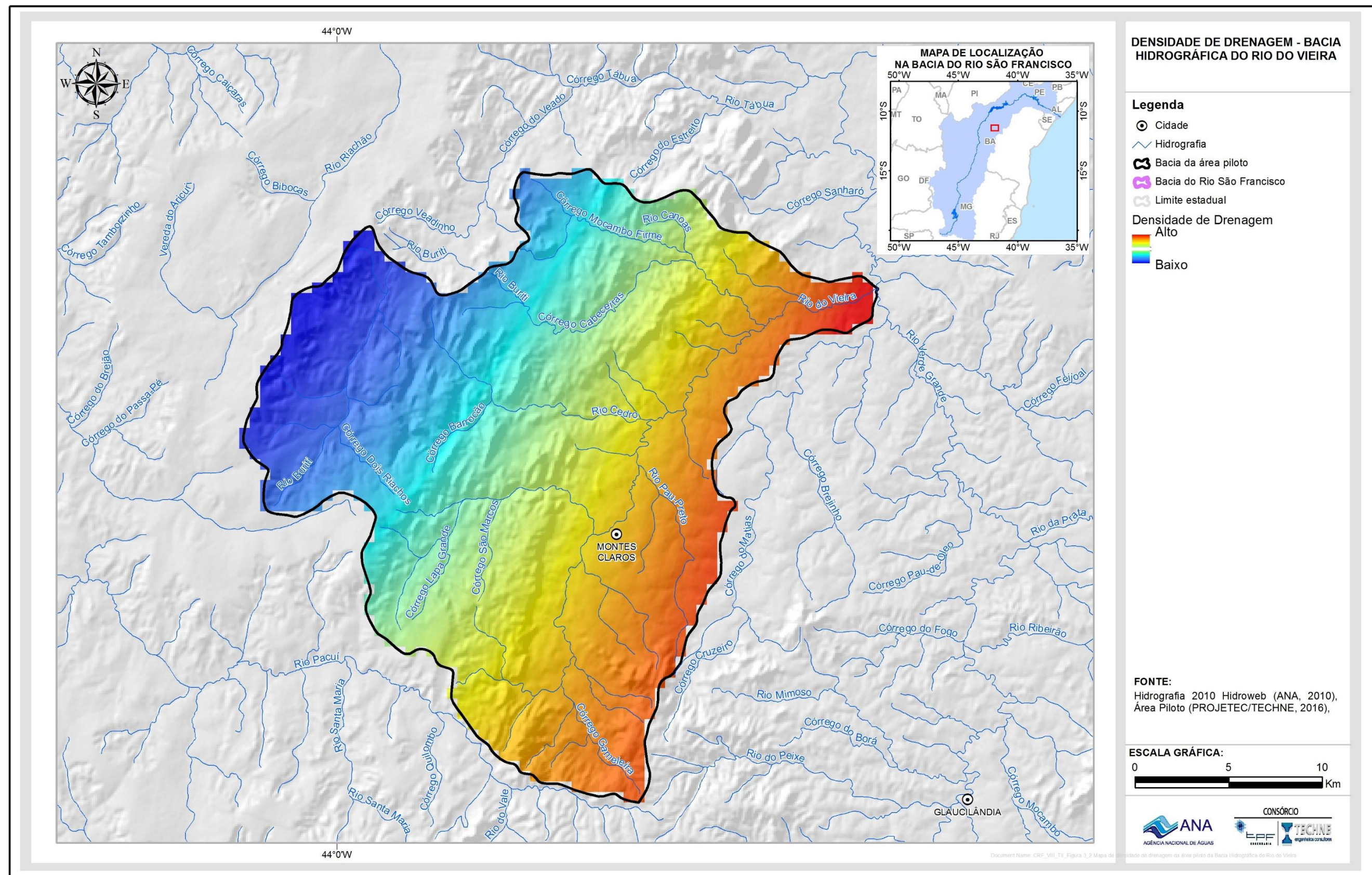


Figura 3.2: Mapa de densidade de drenagem da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

3.2 Unidades de solo

Na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira há ocorrência de vários tipos de solos, distribuídos nas classes de solos com horizontes “B” latossólicos, com horizonte “B” textural, com horizonte “B” incipiente e solos pouco desenvolvidos. Essa bacia é composta basicamente por cinco unidades de solo (Embrapa, 2006). Essas unidades são as seguintes:

Cambissolos Háplicos Tb Distróficos (CXbd) - Caracterizam-se por serem solos com argila de atividade baixa e baixa saturação por bases ($V < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (Embrapa, 2006). É profundo, com consistência úmida muito friável nos horizontes inferiores, inclusive no B incipiente, apresentando matacões em todo o perfil. Esses fragmentos angulosos e subangulosos, parcialmente alterados, são decorrentes do colúvio das áreas adjacentes mais elevadas.

Latossolo vermelho-amarelo Distrófico (LVAd) - Segundo a Embrapa (2006), são solos com saturação por bases baixa ($V < 50\%$) e na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de energéticas transformações no material constitutivo. São virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo.

Latossolos Vermelhos Distróficos (LVd) - São solos minerais com teores de Fe_2O_3 entre 8% e 18% nos solos argilosos ou muito argilosos, e normalmente inferiores a 8% nos solos de textura média. São muito profundos, bem drenados, friáveis ou muito friáveis, de textura argilosa ou muito argilosa e média. Os solos mais oxidícos, de textura argilosa ou muito argilosa, possuem baixa densidade aparente, de 0,84 g a 1,03 g/cm³, e porosidade muito alta ou alta (Embrapa, 2006).

Argissolo Vermelho Alumínico (PVa) - De acordo com Embrapa (2006), são solos com caráter alumínico na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B. A classe dos Argissolos é constituída por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textual de argila de atividade baixa ou caráter alético.

Argissolo Vermelho Eutrófico (PVe) - São solos eutróficos (saturação por bases $\leq 50\%$) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B. Grande parte dos solos desta classe (Argissolos) apresenta um evidente incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B, com ou sem decréscimo nos horizontes subjacentes (Embrapa, 2006).

Na Figura 3.4 tem-se o mapa de unidades de solo (exploratório) da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. O Argissolo Vermelho Eutrófico corresponde a 54% da área total da bacia hidrográfica, seguido do Argissolo Vermelho Alumínico com área correspondente a 30% da bacia, os restantes são 9% de Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, 6% de Latossolo Vermelho Distrófico e apenas 1% de Cambissolo Háplico Tb Distrófico (Tabela 3.5 e Figura 3.3).

Tabela 3.5 – Área ocupada pelas unidades de solo da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Unidades de solo	Área (km ²)
Cambissolo Háplico Tb Distrófico	4,08
Argissolo Vermelho Eutrófico	312,54
Latossolo Vermelho Distrófico	35,44
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	50,79
Argissolo Vermelho Alumínico	176,31

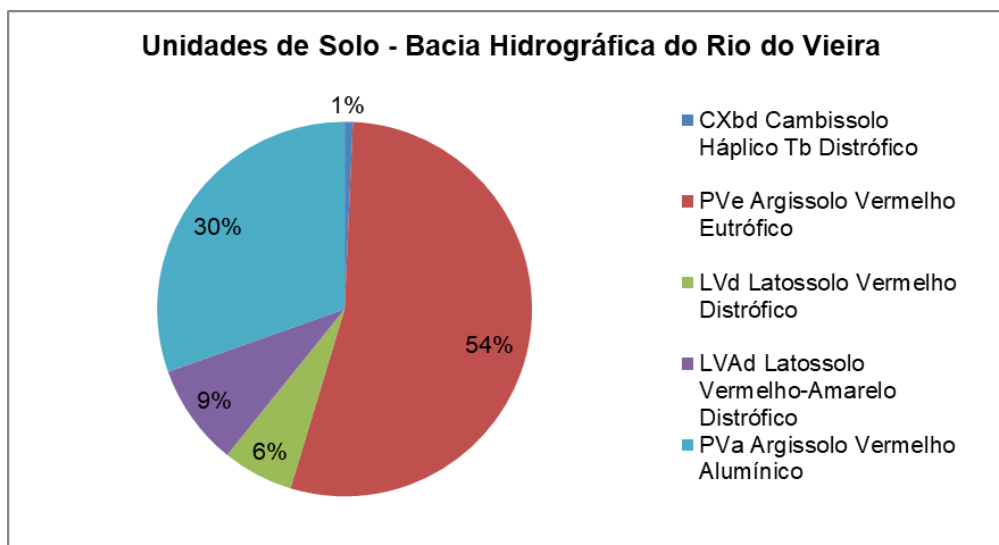


Figura 3.3: Unidades de solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

3.3 Classes de vegetação

A crescente urbanização da cidade de Montes Claros desenvolveu espaços impermeabilizados que alteraram o ciclo hidrológico, promovendo o aumento do escoamento superficial e reduzindo as recargas de águas subterrâneas.

A vegetação desta bacia (Figura 3.5), foi alterada e o motivo principal é a ação antrópica com o corte raso da vegetação natural, práticas inadequadas de cultivos, uso indiscriminado da terra. A partir do mapa, temos a Tabela 3.6, a qual se detalha o percentual ocupado pelas classes de vegetação nessas áreas. Primeiramente, temos que 35% da área da bacia são de vegetação secundária e atividades agrárias. Já 62% correspondem à área de savana, que ainda conserva a Floresta estacional. Segundo a Prefeitura de Montes Claros, há ocorrência de Pau D'arco, Pequi, bloco de Juriti, Jatobá, Macambira, Braúna, Barriguda, além de possuir uma flora rica em plantas medicinais. E ainda a savana é constituída de cerrado caducifólio e subcaducifólio, com pequenas ocorrências de cerrado superemifólio. Somado a esses, tem-se a caatinga hipogerófila. O restante, apenas 3%, é constituído por atividades agrárias.

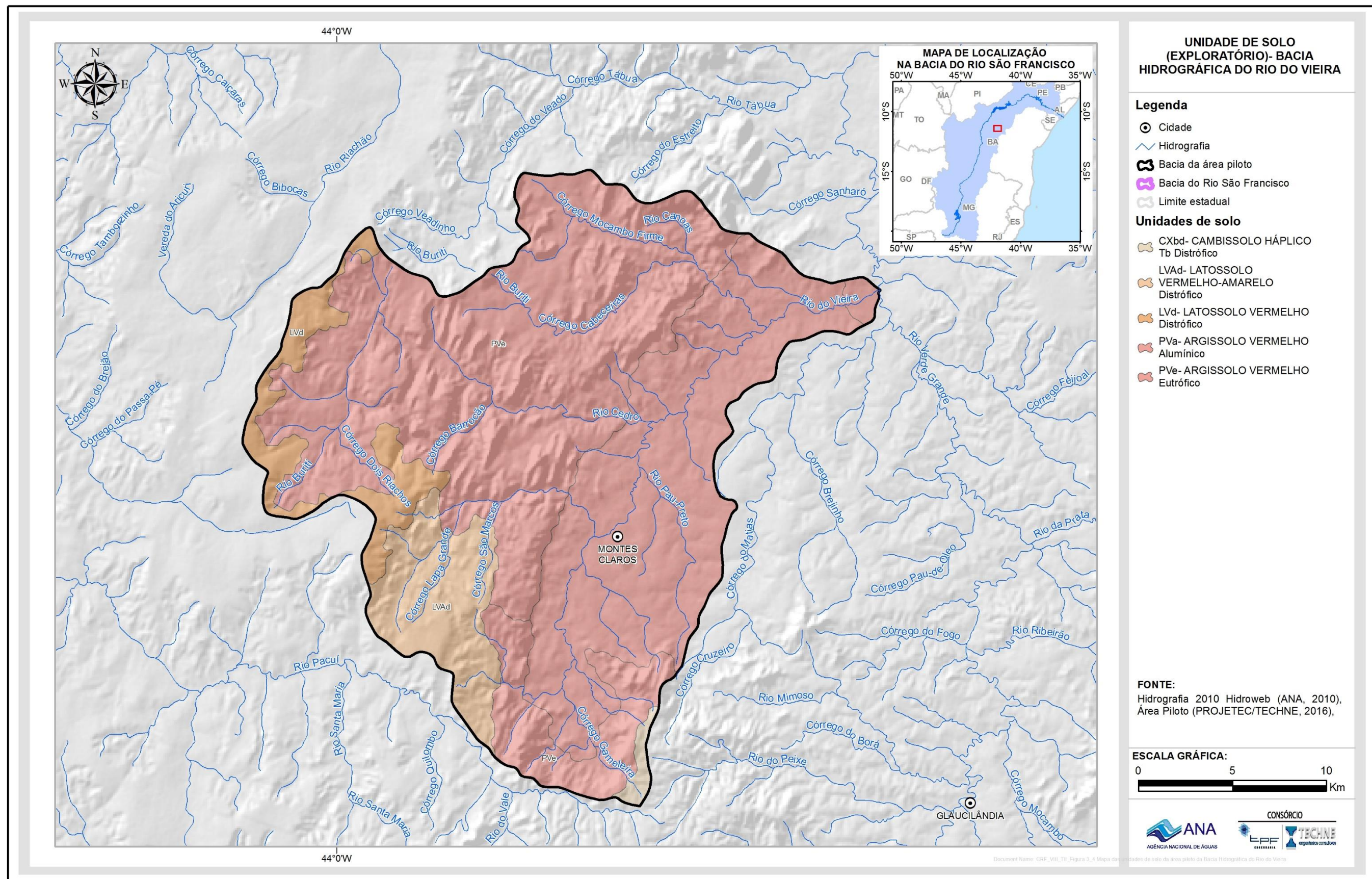


Figura 3.4: Mapa das unidades de solo da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

De acordo com Figura 3.5 a seguir foi possível confeccionar a Tabela 3.6 abaixo, a qual contém a área e porcentagem da vegetação dessa bacia.

Tabela 3.6 – Área e porcentagem da vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Vegetação	Hectares (ha)	Porcentagem (%)
Atividades Agrárias	1.717,34	3%
Savana/ Floresta Estacional	35.644,60	62%
Vegetação Secundária e Atividades Agrárias	20.553,97	35%
Total	57.915,91	100%

As regiões de atividades agrárias e vegetação secundária são aquelas onde não existe vegetação natural, ou seja, houve uma intervenção humana. Desse modo, uma vegetação natural foi retirada através de um conjunto de técnicas utilizadas para cultivar novas plantas ou produtos agrícolas com o objetivo de obter alimentos, fibras, energia, matéria-prima para roupas, construções, medicamentos, ferramentas, ou apenas para contemplação estética.

Segundo a resolução do CONAMA, vegetação secundária ou em regeneração, é aquela resultante de processos naturais de sucessão, após supressão total ou parcial de vegetação primária por ações antrópicas ou causas naturais, podendo ocorrer árvores remanescentes de vegetação primária.

Quando há ocorrência das duas classes de vegetação (atividades agrárias e vegetação secundária) temos uma área de 20.553 ha ocupando toda a parte nordeste da área. As atividades agrárias independentes compreendem uma área de 1.717,34 hectares, sendo o tipo de vegetação menos predominante e presente em uma pequena parte sudeste.

A Savana/Floresta estacional é a classe de vegetação predominante, cerca de 35.644,60 hectares ou 62% da área total em estudo. A faixa de ocorrência vai de norte a sul da área e ocupando todo o lado oeste da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. Caracteriza-se por ser

A Floresta estacional é um ecossistema do bioma Mata Atlântica caracterizado por duas estações, uma seca e outra chuvosa, a primeira mais prolongada, ao contrário da floresta tropical que não mantém estação seca. Em geral, ocupam ambientes que transitam entre a zona úmida costeira e o ambiente semiárido. Daí porque esta vegetação também é conhecida como “mata seca”. Pode ser dividida em decidual (Caducifólia) ou semidecidual (Subcaducifólia).

Nesse tipo de ecossistema também se encontram as savanas, uma vasta área plana com alguma vegetação, poucas árvores e pequenos grupos de arbustos, uma espécie de deserto. É uma região cuja vegetação predominante são as gramíneas salpicadas por algumas árvores esparsas e arbustos isolados ou em pequenos grupos. Normalmente, as savanas são zonas de transição entre bosques e prados.

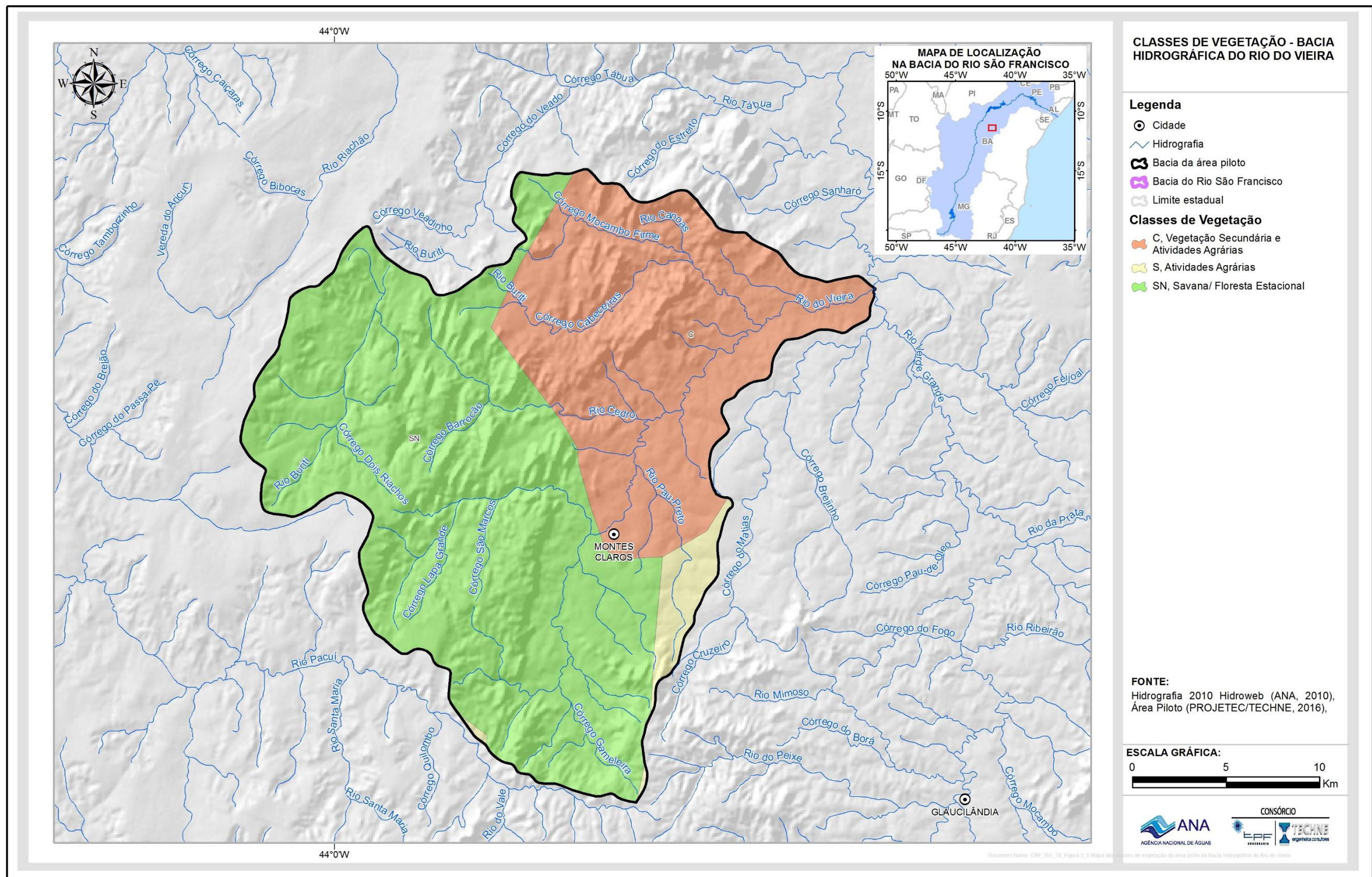


Figura 3.5: Mapa das classes de vegetação da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

3.4 Declividade

A área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira apresenta baixas declividades, ou seja, a região possui predominantemente pequenas variações de altitudes.

É possível ver que essa região abriga semelhantes formas de terreno, pelo fato da presença das maiores áreas de declividade situarem na transição do Cambissolo Háplico com o Argissolo Amarelo nas áreas limítrofes da bacia. Essa bacia apresenta áreas mais declivosas na região norte com valor de altitude máxima entre 1000 a 1220 m, contudo na região sul encontrou-se relevo mais suave com altitudes entre 520 a 630m, na região a montante da bacia hidrográfica constatou-se as menores taxas de perda de solo nos locais com menor declividade e altitude (MAGALHÃES *et al.*, 2012).

A Figura 3.6 representa o perfil topográfico da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.

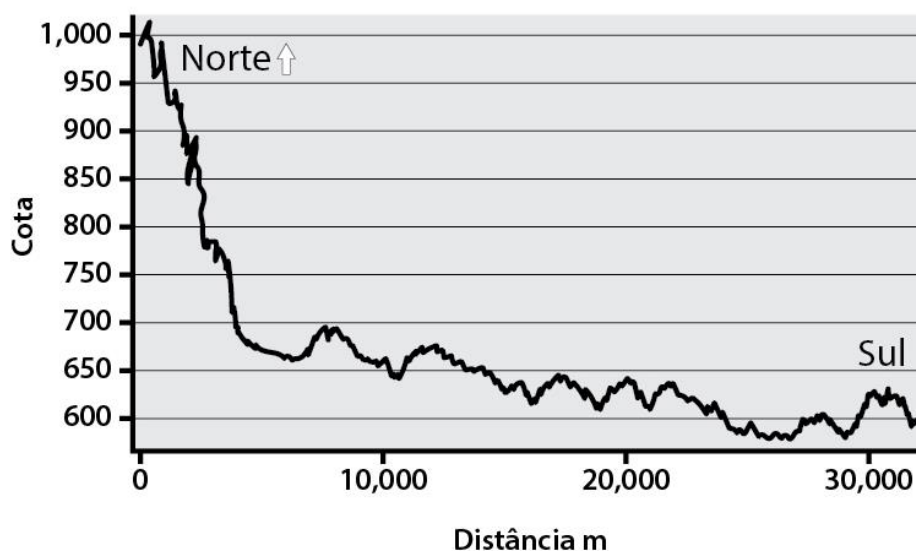


Figura 3.6: Perfil topográfico da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Magalhães *et al.*, 2012).

De acordo com os estudos realizados por Magalhães *et al.* (2012), as áreas susceptíveis a erosão, com baixíssimo risco, apresentaram extensão de 13.450 ha, as áreas de baixo risco 149.710 ha, as áreas de médio risco 120.000 ha, as áreas de alto risco e altíssimo risco apresentaram 21.500 ha (Tabela 3.7).

Ainda segundo o autor, as áreas mais susceptíveis à erosão estão situadas na região sul e porção oeste da bacia. Na parte oeste, as áreas mais sensíveis à erosão estão na região limítrofe à outra bacia hidrográfica, coincidindo com a linha cumeada do relevo da bacia. Já a região que representa um grau médio de risco tem a maior declividade da bacia.

Tabela 3.7 – Quantificação de área e perímetro para as classes de susceptibilidade a erosão na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Magalhães *et al.*, 2012).

Classes de susceptibilidade à erosão	Área (ha)	Perímetro (km)
Baixíssimo risco	13.450	4.120
Baixo risco	149.710	20.330
Médio risco	120.000	19.720
Alto risco	15.500	4.920
Altíssimo risco	6.000	1.980

Segundo Rocha *et al.* (2015), seus estudos de análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira indicaram-na como formada por topografia predominantemente plana no setor centro-nordeste e relevos suaves ondulados nos demais setores da bacia, com inclinações superiores a 20%, constituindo principalmente áreas de vertentes de superfícies tabulares e interflúvios da porção oeste da bacia. Então, além do relativo aplainamento do relevo dessa bacia, também existe amplitudes altimétricas pequenas, atividade erosiva pouco intensa e baixa velocidade no escoamento fluvial.

Na Figura 3.8 tem-se o mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. É importante ressaltar que essa bacia apresenta quase 90% de sua área em declives inferiores 20%, com concentração na faixa entre 0 a 10% e declividade média de 10,04% (Tabela 3.8 e Figura 3.7). No entanto, as áreas com declividades superiores a 30% estão inseridas nas classes de alto risco e altíssimo risco de perda de solo por erosão, essas áreas são os locais com as maiores declividades, solos mais arenosos e que apresentaram o uso inadequado da terra (solo exposto).

Tabela 3.8 – Declividade e área da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Declividade (%)	Área (km ²)
0-10	375,10
10-20	140,36
20-30	41,20
30-40	16,49
40-50	4,93
50-60	0,66
60-72,54	0,11

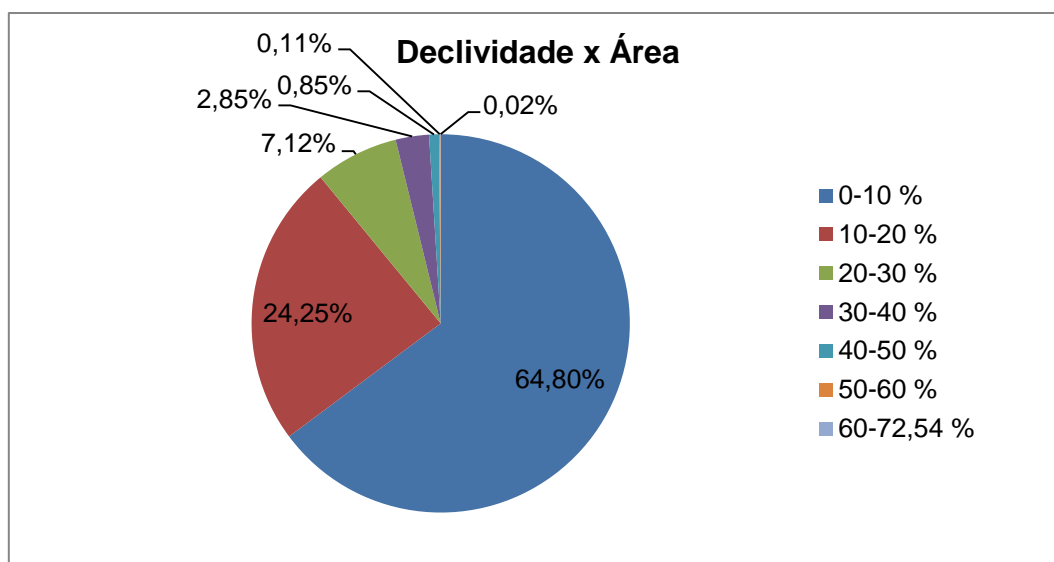


Figura 3.7: Porcentagem da declividade em relação à área da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

3.5 Geomorfologia

A área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira é formada por topografia predominantemente plana no setor centro-nordeste e relevos suaves ondulados nos demais setores da bacia. Existem superfícies com inclinações superiores a 20%, constituindo principalmente áreas de vertentes de superfícies tabulares e interflúvios da porção oeste da bacia. De forma geral, além do relativo aplainamento do relevo, essa bacia tem amplitudes altimétricas pequenas, atividade erosiva pouco intensa e baixa velocidade no escoamento fluvial (Rocha *et al.*, 2015).

O mapa das unidades geomorfológicas da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira está na Figura 3.10 e a porcentagem de cada unidade pode ser vista na Figura 3.9.

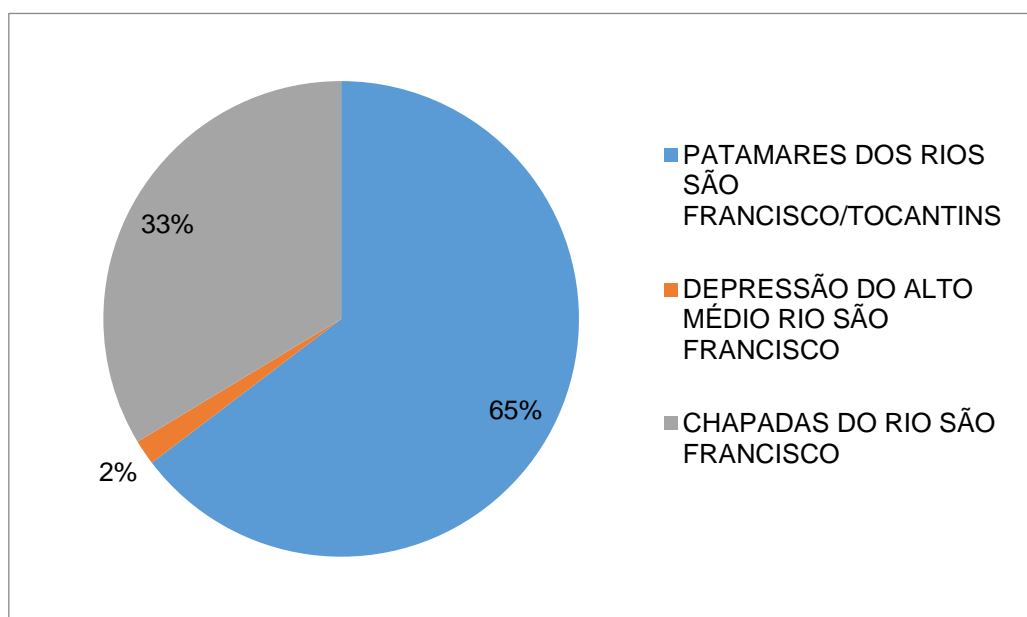


Figura 3.9: Porcentagem das unidades geomorfológicas da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

A unidade “Patamares dos Rios São Francisco/Tocantins” ocupa 65% do relevo da área piloto. Pertence ao domínio crátons Neoproterozoicos e corresponde a uma região de relevo ondulado, que constitui a superfície intermediária entre áreas topograficamente mais altas, representadas pela Serra Geral de Goiás e áreas adjacentes de relevo mais baixo situadas a oeste (IBGE, 2006).

“Chapadas do Rio São Francisco” pertence ao domínio das “Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozoicas”, é conhecida também como Chapadão do Oeste Baiano e representa 33% do relevo da área piloto. Sua principal feição é a Serra Geral de Goiás com cerca de 400 km de extensão no total. Conforme Campos (1996), apresenta desnível de até 200 m, com escarpas abruptas e abundante presença de colúvios e contém a área de recarga do Sistema Aquífero Urucuia (Gaspar, 2006).

A Depressão do Alto-médio Rio São Francisco ocupa apenas 2% da área piloto e corresponde geologicamente à região de ocorrências das rochas do

Supergrupo São Francisco. A unidade apresenta principalmente extensas áreas aplainadas e dissecadas, superfícies onduladas, colinas e áreas de relevo cárstico, como dolinas e uvalas, desenvolvidas em sua maior parte sobre rochas pertencentes ao Grupo Bambuí.

3.6 Uso e ocupação do solo

A malha urbana de Montes Claros (aproximadamente 38 km²) exerce grande influência sobre a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. Além dessa, outras classes, como lavoura temporária, florestal e campestre são importantes na caracterização do uso do solo nessa bacia.

Na área urbana, o município possui um forte comércio, que abastece grande parte das cidades vizinhas e onde estão instaladas as principais redes de lojas e atacadistas do Brasil. São 1066 pequenas, médias e grandes unidades industriais em atividade. No setor de prestação de serviços são ao todo 3411 pequenas, médias e grandes empresas disponíveis no mercado. Entre elas, destacam-se polo têxtil, mineração, GLP, materiais de construção, laticínios e produtos farmacêuticos.

Na área rural destaca-se o setor primário, com a pecuária de corte e leite, seguido pela agricultura com destaque para os produtos: feijão, milho, mandioca, algodão e arroz irrigado.

O uso do solo na agricultura e pecuária tem provocado alterações ambientais nessa bacia pelo efeito da erosão e assoreamento. Um estudo de Schiavetti & Camargo (2002) chegou à conclusão de que a erosão em áreas produtivas rurais ou urbanas é fator de pressão do uso dos recursos naturais, reduz os *habitats* e acelera a redução da diversidade biológica.

Nota-se na Figura 3.12 que a classe de maior ocorrência nessa área piloto é a florestal, que ocupa uma área de 318,31 km², concentrada à montante da bacia, já que a maior parte da cobertura natural está próxima a nascente. Em seguida vem à área urbanizada com 38,23 km², ocupando 7% da área piloto. Já a campestre e lavoura temporária ocupam 35 e 1% da bacia, respectivamente (Figura 3.11).

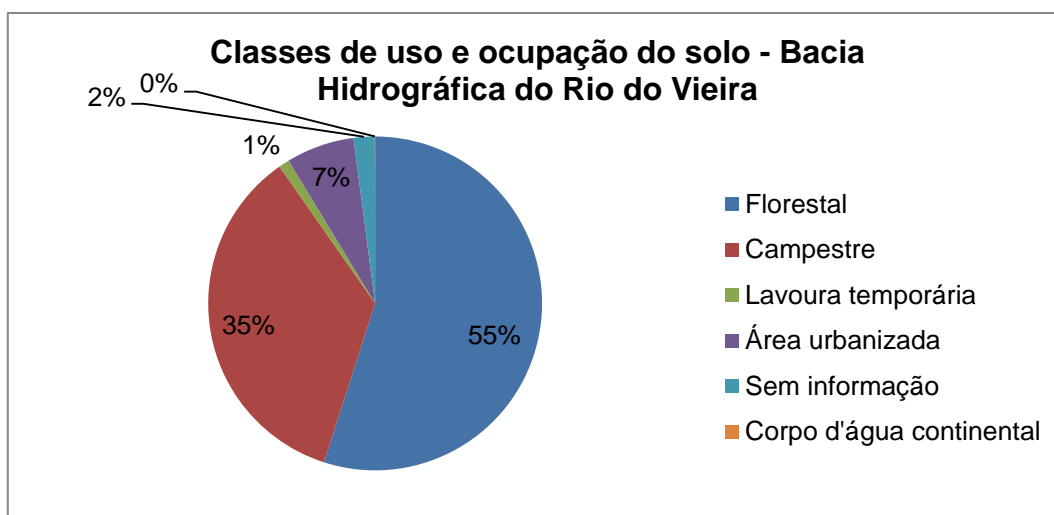


Figura 3.11: Porcentagem de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

A classe definida como sem informação (aproximadamente 2%) representa pontos de confusão entre a resposta espectral e os diversos usos no espaço real. Com isso, alguns pontos que estão com solo exposto pode está sendo preparado para cultivo ou pode ser um indicativo de degradação ambiental.

Como visto na Tabela 3.1 do item 3.1, a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira é composta por nove sub-bacias. A seguir, tem-se as principais atividades e os recursos naturais a montante de cada sub-bacia, de acordo com estudo realizado por Borges (2007).

Sub-bacia do Córrego Palmital - Essa sub-bacia está a montante da cidade de Montes Claros, próxima do aterro controlado, da BR 365 e da estrada de terra que dá acesso às fazendas desta sub-bacia e à região das nascentes. A mata ciliar está comprometida pelas atividades agrícolas desenvolvidas. O desmatamento é verificado já na primeira fazenda vizinha da região das nascentes e as atividades rurais ocorrem com predominância da bovinocultura de leite. Nessa sub-bacia encontram-se as nascentes e a principal brota na Serra do Mel também conhecida como Serra do Vieira, divisor de águas com beleza natural significativa.

Nas proximidades das nascentes, a mata é mais fechada e se pode observar gado pastando. Logo a jusante da primeira cachoeira há uma pequena criação de porcos. A cachoeira possui estrutura de concreto que forma um tanque, onde visitantes tomam banho. Da cachoeira sai uma canalização que conduz um fluxo de água à jusante.

Sub-bacia do Córrego dos Porcos - Está localizada à margem direita do Rio do Vieira, com altitude de 676 m e tem-se uma área de vegetação ciliar, com árvores de porte alto, além de um aterro controlado próximo com altitude de 681 m, o que pode ocasionar contaminação por percolado. Após esse ponto, as águas do Rio do Vieira já recebem a contribuição do Córrego Palmital, intermitente e inexpressivo para agricultura com fins comerciais.

Esta sub-bacia é o primeiro afluente formador do principal curso de água do Rio do Vieira e nela encontra-se a Serra dos Porcos, divisor de águas em bom estado de conservação e de beleza paisagística. Podem ser vistos animais pastando por descuido no cercamento das propriedades.

Sub-bacia do Córrego Gameleira - Localiza-se na margem direita do Rio do Vieira, numa altitude de 658 m e está à esquerda do aterro controlado com 23 m de desnível dele. Este ponto está próximo da ponte da estrada de terra que dá acesso à comunidade/Bairro São Geraldo e da BR-365. Neste ponto, o Rio do Vieira já recebeu a contribuição do Córrego dos Porcos. É uma região predominantemente rural, com lançamentos de cargas difusas rurais. No sentido do fluxo do rio ocorrem atividades de bovinocultura de leite e haras, em atividade recente, para animais de equitação com número expressivo de baias, com características de sítios utilizados em finais de semana. A Serra dos Porcos é o divisor de águas e a mata ciliar na maior parte da área está comprometida pelo desmatamento.

Sub-bacia do Córrego São Geraldo - A montante deste ponto tem-se o Bairro de São Geraldo, no lado direito da BR 365, chácaras e loteamentos em início de ocupação. No lado esquerdo há o aterro controlado, com 49 m de desnível do ponto anterior, loteamentos e bairros em processo de habitação. À jusante do aterro ocorrem atividades de chacreamento, haras e loteamento. A agricultura praticada é familiar, predominando o cultivo de hortaliças.

Sub-bacia do Córrego Vargem Grande - Essa sub-bacia está em sua maior parte dentro de área urbana, parte do seu curso canalizado e uma pequena porção rural sofre a influência da urbanização, destacam-se os loteamentos, sinais visíveis do processo urbanístico e a pressão resultante sobre a paisagem natural. A área é predominantemente habitada por população de baixo poder aquisitivo.

Sub-bacia do Córrego dos Bois - Está em uma altitude de 632 m e mais próximo da urbanização da cidade de Montes Claros, localizado a montante do primeiro lançamento de esgoto doméstico. Neste ponto está à margem direita do Rio do Vieira, dentro do Bairro Morada do Parque, onde o rio já recebeu contribuições dos córregos São Geraldo e Gameleira.

Pela margem direita do Rio do Vieira há um clube de porte pequeno, uma área de preservação permanente e área de mata ciliar que passou por um período de invasão, com retirada de água por bombeamento instalado nas margens, provocando assoreamento. A montante localiza-se parte da área rural de Montes Claros, loteamentos e áreas residenciais e um condomínio de classe média. Nessa área ocorre irrigação e criação de pequenos animais, exemplificando a criação de porcos.

Nas áreas de domínio do Parque Guimarães Rosa, a mata ciliar está comprometida no percurso do rio dentro do parque; neste trecho o rio já recebe as pressões urbanas, como os lançamentos de efluentes domésticos e industriais, as cargas difusas urbanas e rurais; a disposição inadequada de resíduos sólidos, a contribuição da rede coletora de água pluvial e o fluxo de transporte em suas margens impermeabilizadas pela construção de ruas e

avenidas que facilitam o deslocamento entre os bairros, estes construídos até nas proximidades das margens do Rio Vieira e de seus afluentes.

Sub-bacia do córrego do Cintra - Neste ponto o Rio do Vieira ainda não entrou no Distrito Industrial e já recebeu a contribuição dos córregos Vargem grande pela margem direita e do Córrego dos Bois pela margem esquerda. Recebe também lançamento de efluente, cargas difusas rurais e urbanas que conduzem os resíduos das atividades da cidade e do meio rural, dispostas na bacia hidrográfica.

Os afluentes também são contribuintes com efluente doméstico e/ou industrial, como também são receptores de cargas difusas urbanas e rurais.

Sub-bacia do Rio do Cedro - Essa sub-bacia está posicionada a jusante das indústrias. Na parte rural dessa sub-bacia estão implantadas comunidades rurais, florestas homogêneas de eucaliptos, que ocupam áreas significativas.

Nessa sub-bacia há loteamentos, horticulturas e criação de animais domésticos até as proximidades das margens do Rio do Vieira; predomina pecuária leiteira, existindo também a pecuária de corte e criação de aves.

Os recursos naturais são muito, com beleza paisagística única e potencial para turismo ecológico, entre eles o Morro do Encanto, Serra Bonita, afloramentos calcários, Morro Dois Irmãos e Parque Estadual da Lapa Grande. Na comunidade rural Rebentão dos Ferros localiza-se a captação de água de uma surgência denominada Rebentão dos Ferros, responsável pelo fornecimento de aproximadamente 10% do abastecimento da cidade. Os proprietários de terras que formam a comunidade contam que, após a captação, a produção de hortaliças foi inviabilizada economicamente, consequência da redução do volume de água disponível para exploração de todas as atividades agrícolas desenvolvidas.

Em outro ponto dessa sub-bacia, a jusante da cidade de Montes Claros, num espaço próximo da área pertencente ao Núcleo de Ciências Agrárias, o Rio do Vieira já recebeu a contribuição do Rio do Cedro. Nessa região predominam chácaras e sítios, além de bovinocultura de leite. Nessa área, iniciou-se implantação de bacias de captação e retenção de água, objetivando a recarga dos cursos de água subterrâneos e superficiais, proteção das estradas rurais e fortalecimento das atividades agrícolas.

Sub-bacia do Rio Canoas - Neste ponto, o Rio Vieira já recebeu a contribuição do Rio Canoas, único afluente que não passa pela área urbana de Montes Claros e não é receptor de carga orgânica produzida pela cidade. É uma região onde predomina as atividades rurais, destacando-se a bovinocultura de leite. O Rio Canoas nasce próximo à região da barragem de Miralta, município de Montes Claros - MG, e percorre até desaguar quase no final do leito principal do Vieira, a uns 20 km de Montes Claros, no sentido da Estrada da Produção.

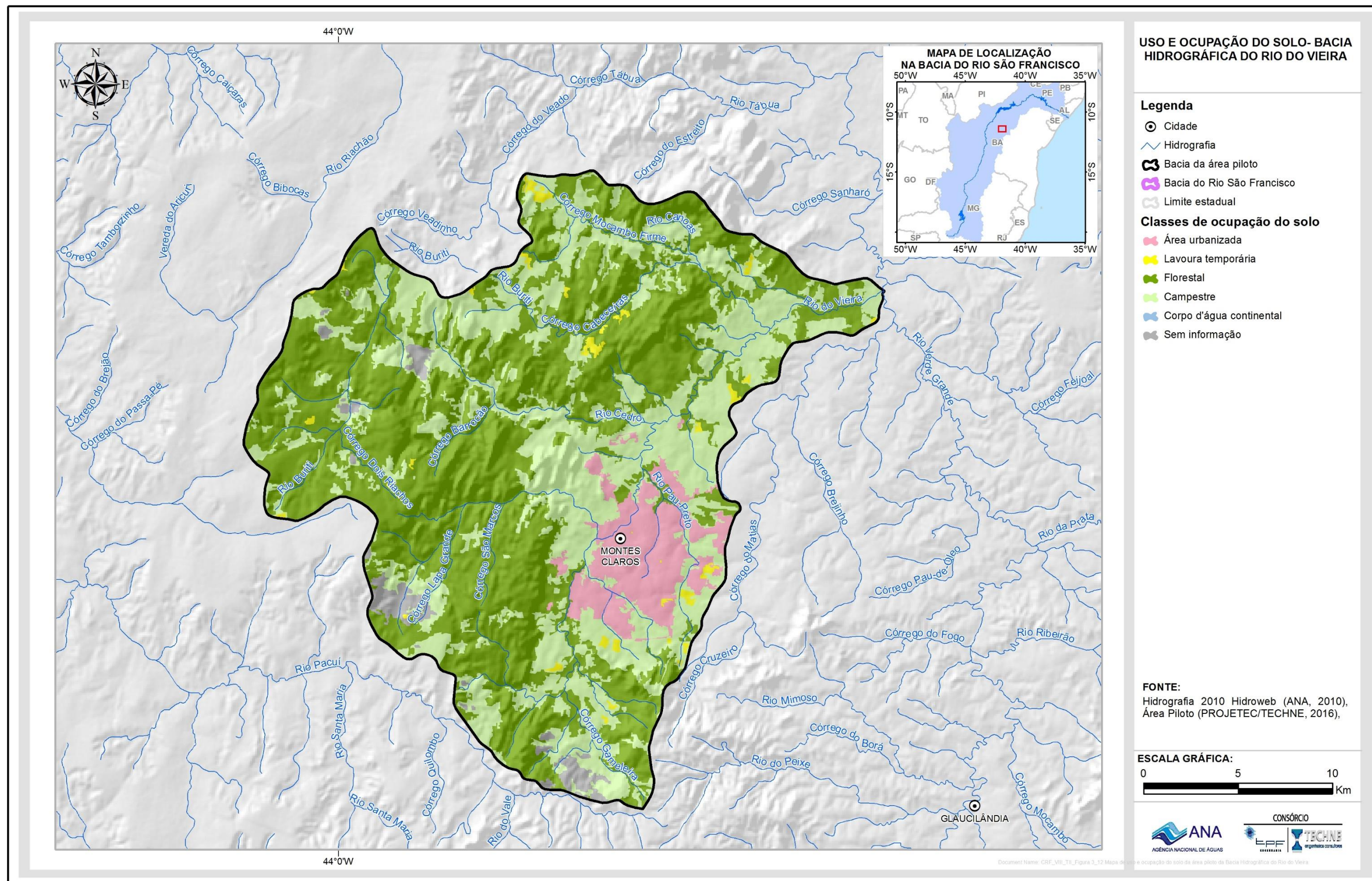


Figura 3.12: Mapa de uso e ocupação do solo da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

4. GEOLOGIA

No âmbito da realização do presente estudo, com a finalidade de representar de forma eficiente o carste da bacia do São Francisco, tendo em vista a gestão dos recursos hídricos, foi proposta uma abordagem integrada, para a definição dos domínios e subdomínios geológicos. Além da importância dos ricos atributos espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos que demandam um manejo especial, o carste na bacia do rio São Francisco tem grande relevância no cenário hídrico superficial e subterrâneo dos estados banhados pelo rio e seus afluentes. Sendo domínios hidrogeológicos grandes áreas que comungam feições idênticas ou semelhantes, quanto à geomorfologia, geologia, estrutura, padrões de deformação, litologia, hidrogeologia, recarga e descarga. E subdomínios, áreas, nos domínios, onde são percebidas diferenças nessas feições, mas que não são suficientes para individualizar um novo domínio.

Nesse contexto a área piloto do Rio do Vieira nos subdomínios IVa e IVb do domínio IV que se intitula Grupo Bambuí Deformado E, que corresponde ao compartimento estrutural leste da bacia do São Francisco, onde afloram rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí.

O subdomínio IVa desenvolve-se desde o sul da Bahia, segundo uma faixa carbonatada N-S, passando pela região de Jaíba e pela região de Montes Claros e, mais a sul, pela região de Curvelo. A partir dessa cidade, a faixa carbonatada busca a região de Lagoa Santa onde termina, fazendo contato com complexos ortognáissicos do embasamento Arqueano e caracterizando, assim, um dos limites sul do Carste São Francisco.

Afloram extensivamente, ao longo de todo o subdomínio IVa, rochas carbonatadas do Subgrupo Paraopeba Indiviso. De Janaúba para sul, entretanto, tornam-se frequentes ocorrências ostensivas de calcários escuros da Formação Lagoa do Jacaré. Essas ocorrências, que se destacam nitidamente na paisagem formando elevações isoladas (CPRM/COMIG, 2003), caracterizam o Subdomínio IVb. Uma dessas ocorrências tem caráter mais amplo, ocupando toda a porção ocidental da área de estudo. Ocorrem, esporadicamente, resquícios dos arenitos Urucuia capeando discretamente o topo de algumas elevações.

A faixa carbonática que caracteriza o subdomínio IVa se limita a leste predominantemente com a Formação Serra do Catuni, do Neoproterozoico mais antigo, por uma falha extensional N-S. A cidade de Montes Claros está situada apenas 40 km a oeste dessa falha, à qual podem, talvez, ser atribuídos os tremores de pequena magnitude sentidos recentemente nessa cidade.

Uma pequena intensidade de deformação se manifesta nos subdomínios IVa e IVb, particularmente nas regiões de Montes Claros e Curvelo, caracterizada por lineamentos perceptíveis em imagens de satélite.

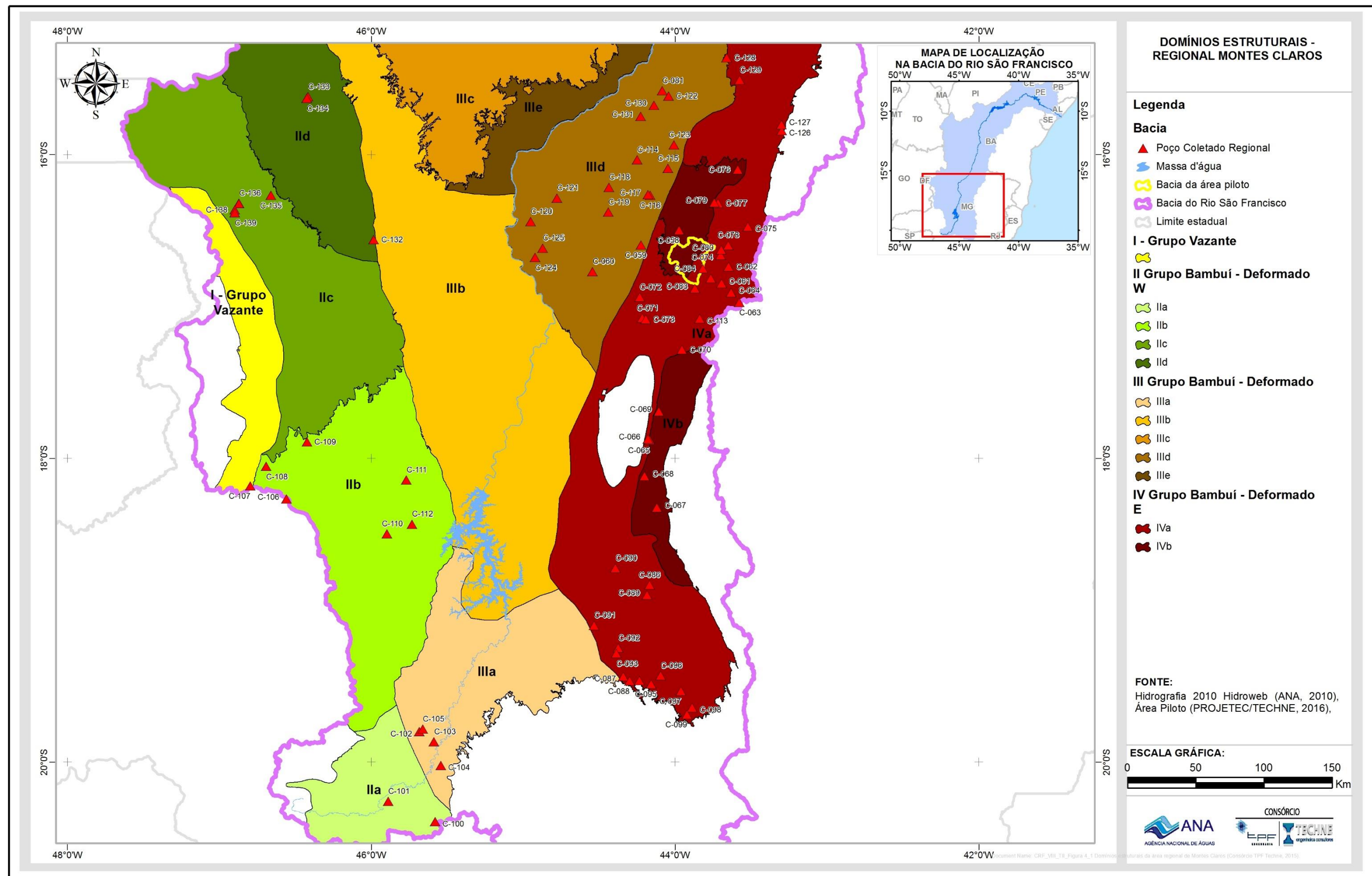


Figura 4.1: Domínios estruturais da área regional de Montes Claros.

4.1 Geologia local

Predominam, na área, rochas da Formação Lagoa do Jacaré, pertencentes ao Grupo Bambuí, de idade Neoproterozoica. Essas rochas encontram-se, por vezes, recobertas discordantemente por relíquias de arenitos do Grupo Urucua (Mesozoico), no topo de algumas elevações. Complementando a sequência sedimentar, são comuns amplas áreas recobertas por sedimentos cenozoicos, dentre os quais citam-se coberturas detríticas aluvionares, eluvionares e coluvionares.

Ao observar o mapa geomorfológico da região, nota-se que duas superfícies altimétricas distintas estão presentes na área da Bacia do Rio do Vieira. Essas superfícies são as seguintes: (a) região centro-leste do mapa, onde se assenta a zona urbana de Montes Claros, caracterizada por uma superfície de aplainamento na cota média de 650 m, desenvolvida em siltitos e calcários da porção inferior da Formação Lagoa do Jacaré; (b) a região centro-oeste do mapa, onde se destaca uma superfície residual na cota média de 759 m, desenvolvida em calcários da porção superior da Formação Lagoa do Jacaré, em virtude da sua maior resistência à erosão (Figura 4.3).

Além do relatório e mapeamento geológico também foram elaborados dois perfis geológicos (AB, CD) (ANEXO 2.7) na área piloto com o propósito de esclarecer a geologia da área que está sendo aqui proposta como base para futuras pesquisas.

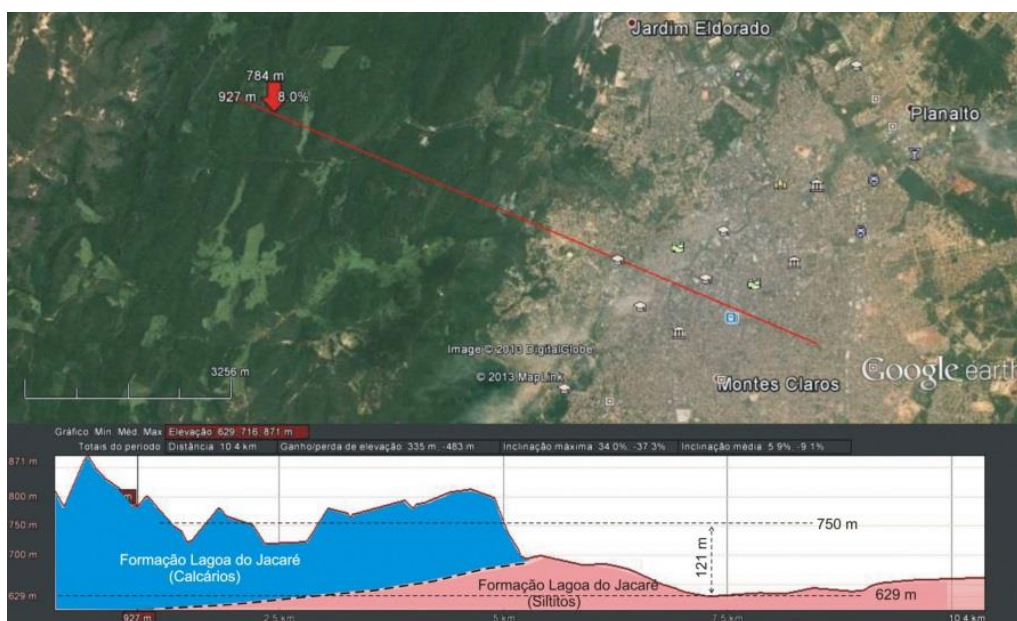
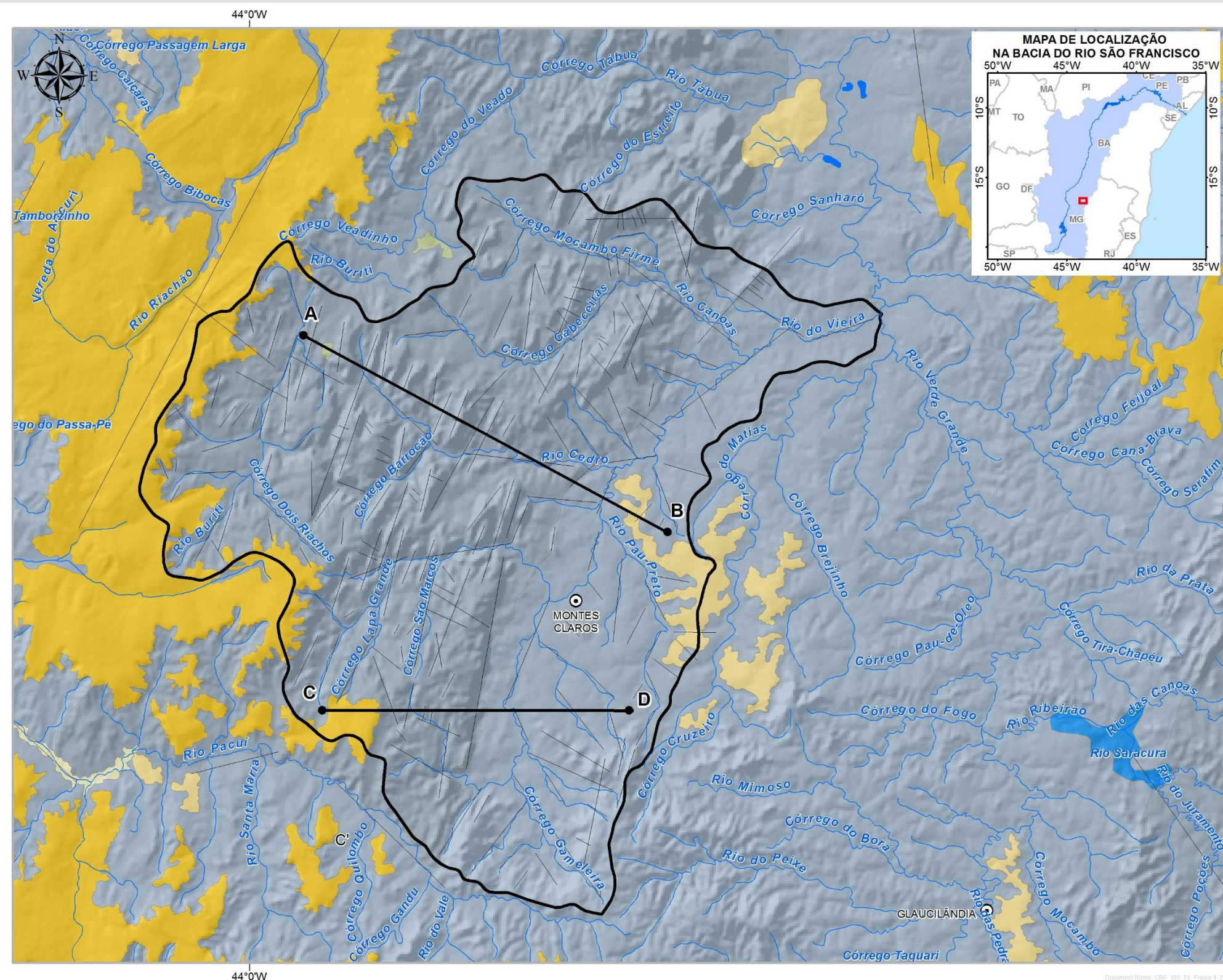


Figura 4.3: Corte geológico* na região de Montes Claros, mostra duas superfícies altimétricas distintas – Formação Lagoa do Jacaré (calcário) e Formação Lagoa do Jacaré (siltito).

*Topografia obtida do Google Earth.



GEOLOGIA - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO DESIDÉRIO

Legenda

- Cidade
- Corte - Perfil geológico
- Lineamentos estruturais
- Hidrografia
- Massa D'água
- Bacia da área piloto
- Bacia do Rio São Francisco
- Limite estadual
- Água

Depósitos Cenozóicos

- ENdl; Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas; Areia, Argila, Cascalho, Laterita
- NQdl; Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas; areia com níveis de de argila e cascalho, e crosta laterítica
- Q2a; Depósitos aluvionares; Areia

Depósitos Cretácicos

- K2u; Grupo Urucuia; Arenito, Arenito conglomerático, Pelito

Grupo Bambui - Subgrupo Paraopeba

- NP2lj; Formação Lagoa do Jacaré; Calcarenito, Siltito, Marga
- NP2ljc; Formação Lagoa do Jacaré, calcário; Calcário
- NP2ljm; Formação Lagoa do Jacaré, marga; Calcário, Siltito, Marga
- NP2ljs; Formação Lagoa do Jacaré, siltito; Siltito

FONTE:

Hidrografia 2010 Hidroweb (ANA, 2010), Área Piloto TPF/TECHNE, 2016), Mapa Geológico do Estado da Bahia (CPRM, 2003), Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais (CPRM, 2003).

ESCALA GRÁFICA:

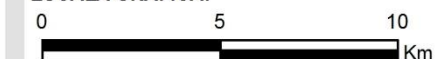


Figura 4.2: Mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

4.1.1 Formação Lagoa do Jacaré

A Formação Lagoa do Jacaré constitui a única unidade do Grupo Bambuí ocorrendo na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, predominando, ademais sobre as outras unidades presentes. Esta formação é caracterizada por calcários pretos a cinza, localmente oolíticos e psolíticos, por vezes odorosos, podendo incluir margas e intercalações de siltitos e folhelhos de coloração esverdeada. Os calcários apresentam-se em estratos paralelos a levemente inclinados, geralmente separados entre si por pequenas superfícies onduladas e ocorrem preferencialmente na porção centro-oeste da área mapeada, em cotas acima dos 500 metros. Apresentam-se sub-horizontais, com direção preferencial NE-SW.

A intensa recristalização e a presença de nódulos de *chert* são algumas das características desses calcários. Além das marcas onduladas (*climbing ripples*), ao longo de toda a área constatou-se a presença de outras estruturas sedimentares reliquias, isto é, estratificação plano-paralela, estratificações cruzadas tabular e acanalada de pequeno porte (*sets* centimétricos) e raramente *hummockys* (Figura 4.4 e 4.5). Observa-se ainda uma alternância de calcários e margas e/ou calcários e siltitos. Em raros trechos ocorrem lentes pelíticas que podem gradar para margas (Figura 4.6). Podem ainda apresentar estrutura lapiás no topo dos afloramentos (Figura 4.7).

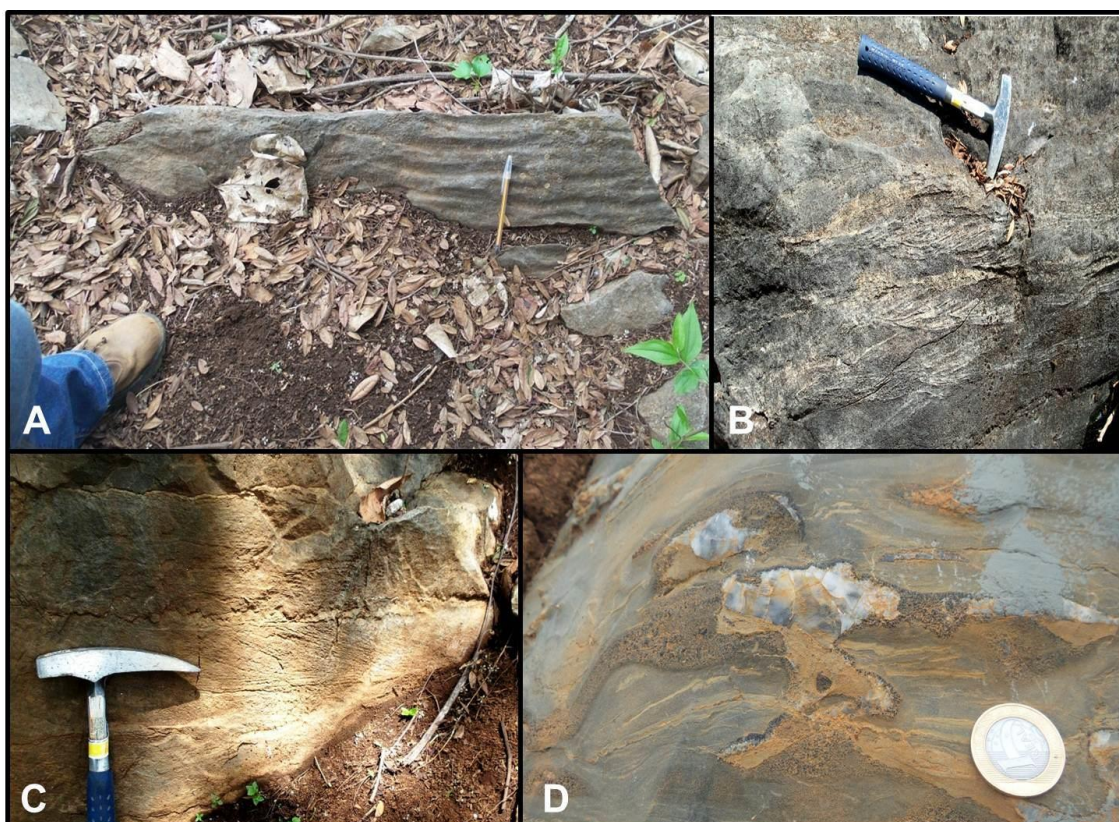


Figura 4.4: Ponto V-212P: A – Calcarenito com marcas de onda; B e C – Estruturas reliquias, estratificação cruzada acanalada e estratificação cruzada tabular, respectivamente. Ponto V-061P: D – Calcita recristalizada.

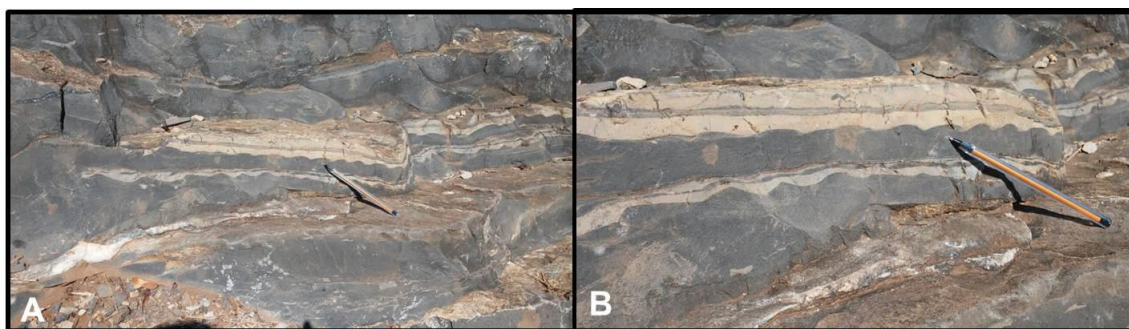


Figura 4.5: Vista em detalhe do afloramento V-077P.



Figura 4.6: Vista geral do afloramento V-216P. Calcário maciço, fraturado e com lapiás no topo.



Figura 4.7: A – Vista geral do afloramento V-187P, Rodovia BR-135; B – Camadas horizontalizadas com marcas onduladas no topo e na base; C – Estrutura plumosa.

O Parque Estadual da Lapa Grande, com cerca de 8 mil ha, situa-se na porção oeste da área em estudo, em altas cotas nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior. Afloram, nessa área maciços calcários onde se desenvolveu um sistema cárstico completo, com dolinas, sumidouros e surgências.

Observou-se nessa área pelo menos três fácies distintas nos calcários: (a) na base ocorre um calcário cinza claro, maciço, sub-horizontal com raras fraturas, gradando para; (b) calcário cinza claro, sub-horizontal, com camadas variando entre 20 a 30 cm de espessura, por vezes com marcas de onda no topo e base das camadas e lentes de calcita recristalizada; (c) calcário laminado, no topo, de granulação mais fina. (Figura 4.8).

Muitas vezes essa unidade aparece capeada pelas coberturas detríticas terciário-quaternárias, nas superfícies pediplanizadas das bordas leste e oeste da área piloto.

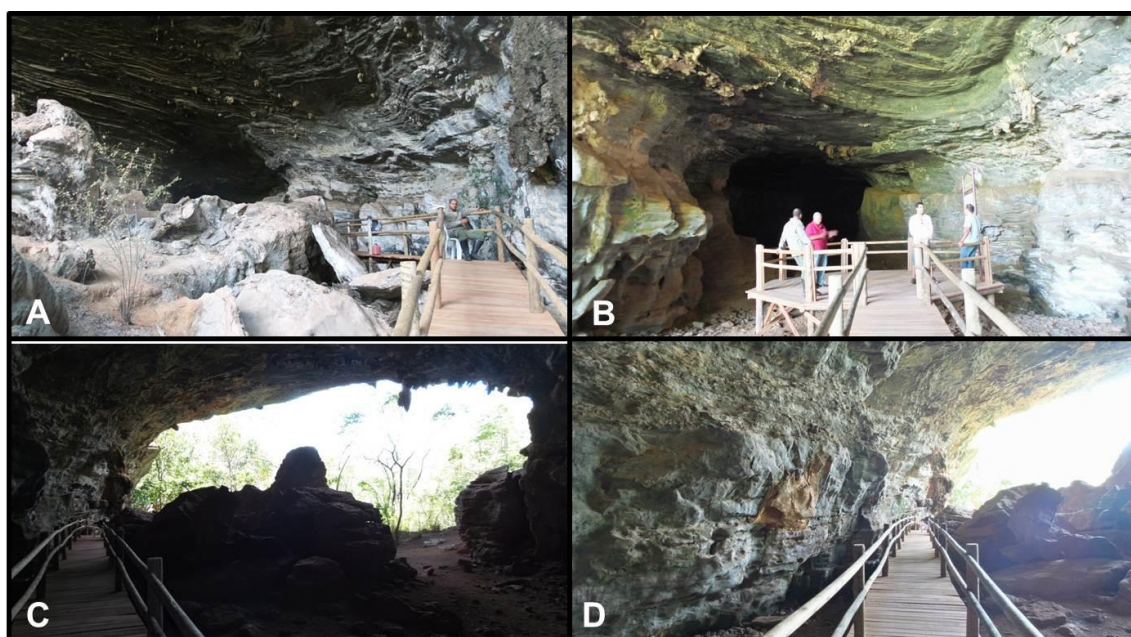


Figura 4.8: A, B, C, D – V-205P – Parque Estadual da Lapa Grande. Calcários cinza maciço na base, e calcários laminados e com granodecrescência ascendente para o topo.

Na cachoeira de Buriti do Campo Santo (V-211P), imediatamente a sul do Parque Estadual da Lapa Grande, devido à época de seca, pode-se observar o empilhamento e intercalação das camadas horizontalizadas, com espessura variando de 10 a 30 cm, de margas e siltitos. Também foram visualizadas estruturas, tais como, marcas de onda de topo e de base, além de sedimentação reliquia (Figura 4.9).

Na porção leste da área ocorre a Formação Lagoa do Jacaré Inferior, composta predominantemente por uma alternância de calcários e siltitos, de espessuras métricas. Os siltitos mostram uma pronunciada clivagem ardósiana e por vezes evoluem para uma marga esverdeada.

Na porção sul da área a alternância de calcários e siltitos é também claramente observada, exibindo suave mergulho para NW (Figura 4.11).



Figura 4.9: V-212P – A – Vista geral do afloramento; B – Camadas horizontalizadas com marcas de onda na base; C – Marcas de onda (em detalhe); D – Acamamento plano paralelo.

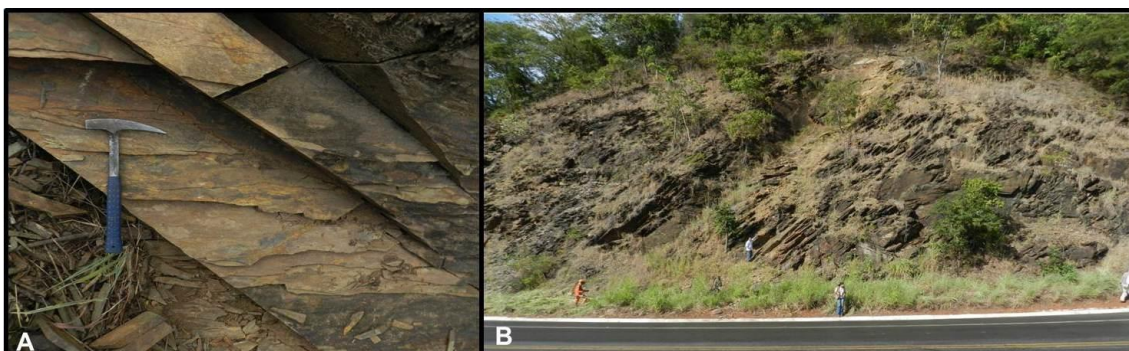


Figura 4.10: Formação Lagoa do Jacaré (siltito): A – V-005P; B – V-006P.



Figura 4.11: Intercalação calcário/siltito, afloramento V-017.

Admite-se que a deposição da Formação Lagoa do Jacaré ocorreu após a deposição da Formação Serra de Santa Helena quando um rebaixamento do nível do mar possibilitou a sedimentação da sequência pelito-carbonática, acima descrita, numa plataforma de alta energia, sujeita a constante retrabalhamento (brechas intraclásticas) e episódios de tempestades (*hummocky*¹) intercaladas com períodos de relativa calmaria. As gretas de contração observadas em vários locais evidenciam a emersão de algumas partes da formação, provavelmente por curtos períodos de tempo. Outra das feições características da formação é a cor negra dos calcários e a abundância de sulfetos (pirita), que indica condições de sedimentação redutoras e uma atividade orgânica intensa.

¹ Estratificação cruzada característica de zona litorânea sob o efeito de ondas.

4.1.2 Grupo Urucuia

Em grande parte das regiões estudadas o Grupo Urucuia, de idade Cretácea, ocorre recobrimdo o Grupo Bambuí. Essa unidade é constituída por arenitos quartzosos que variam de vermelho a branco, com granulação fina a média, em sua maioria com grãos bem selecionados, sem matriz pelítica.

Na área aqui estudada, o Grupo Urucuia ocorre muito restritamente, de forma reliquiar. Aflora no ponto V-165 sobre as rochas calcárias da Formação Lagoa do Jacaré (Figura 4.12). É constituído de arenitos compactados, com grãos bem selecionados e de coloração avermelhada. Possui uma mega estratificação plano-paralela no topo, estratificação cruzada tabular e acanalada na base. Devido às fácies e estruturas encontradas em campo, pode-se relacionar a sedimentação do Grupo Urucuia a um sistema eólico-fluvial.

Algumas das evidências que confirmam este ambiente deposicional são: disposição dos arenitos em estratos cruzados tabulares e acanalados; ótima seleção e escassa matriz argilosa; feição típica de retrabalhamento eólico Campos & Dardenne (1997b).

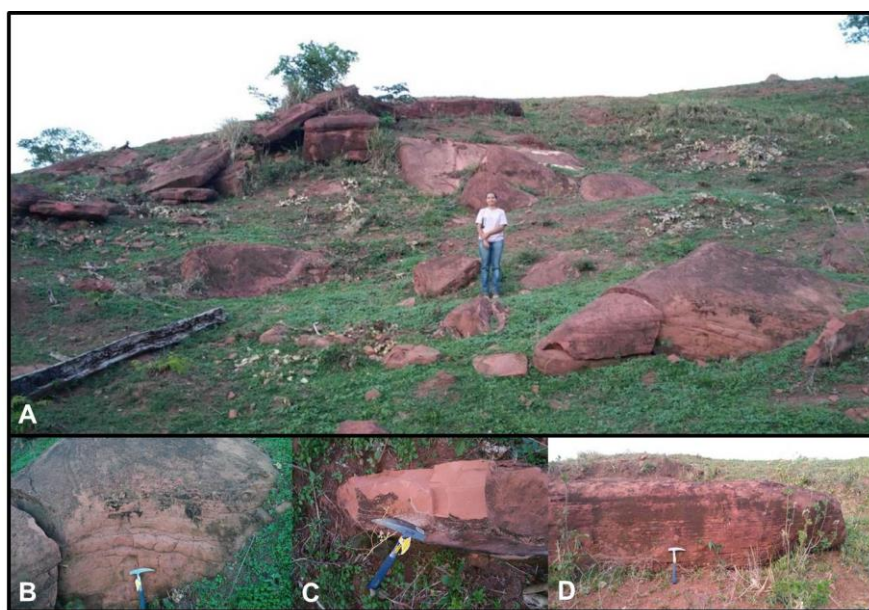


Figura 4.12: A – Vista geral do afloramento V-165; B, C, D – ilustram as estruturas encontradas em campo.

4.1.3 Coberturas cenozoicas

Os depósitos cenozoicos aparecem na área recobrando as rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré. Esses depósitos aparecem bordejando a área piloto tanto no extremo leste quanto no extremo oeste. São sedimentos inconsolidados alúvio-eluvionares, na maioria das vezes areno-argilosos e inconsolidados, apresentando um nível de cascalho ou ainda, uma cobertura laterítica.

4.2 Mapeamento geológico

4.2.1 Geologia estrutural

No contexto tectônico regional do projeto, a área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira encontra-se no domínio da cobertura deformada do Cráton do São Francisco, na região sob influência do cinturão marginal de dobras e empurrões da Faixa Araçuaí.

A leste da área piloto o limite convencional da Faixa Araçuaí com o Cráton do São Francisco é dado pelos sistemas de falhas de empurrão que jogam o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Macaúbas por sobre as unidades mais jovens pertencentes ao Grupo Bambuí (Figura 4.13).

A oeste da área piloto ocorre o domínio central de cobertura não deformada do Cráton do São Francisco. A Faixa Araçuaí apresenta na região uma estruturação NNE, com eixos de dobras com essa orientação e vergência tectônica para WNW.

Na área piloto em estudo, as rochas do Grupo Bambuí mostram diversas estruturas sedimentares bem evidentes, destacando-se o acamamento sedimentar reliquiar. Este é por vezes cortado por uma fina clivagem ardosiária, de origem tectônica, plano-axial a dobras em geral abertas (Figura 4.14), por vezes associadas a falhas de empurrão (Figura 4.15).

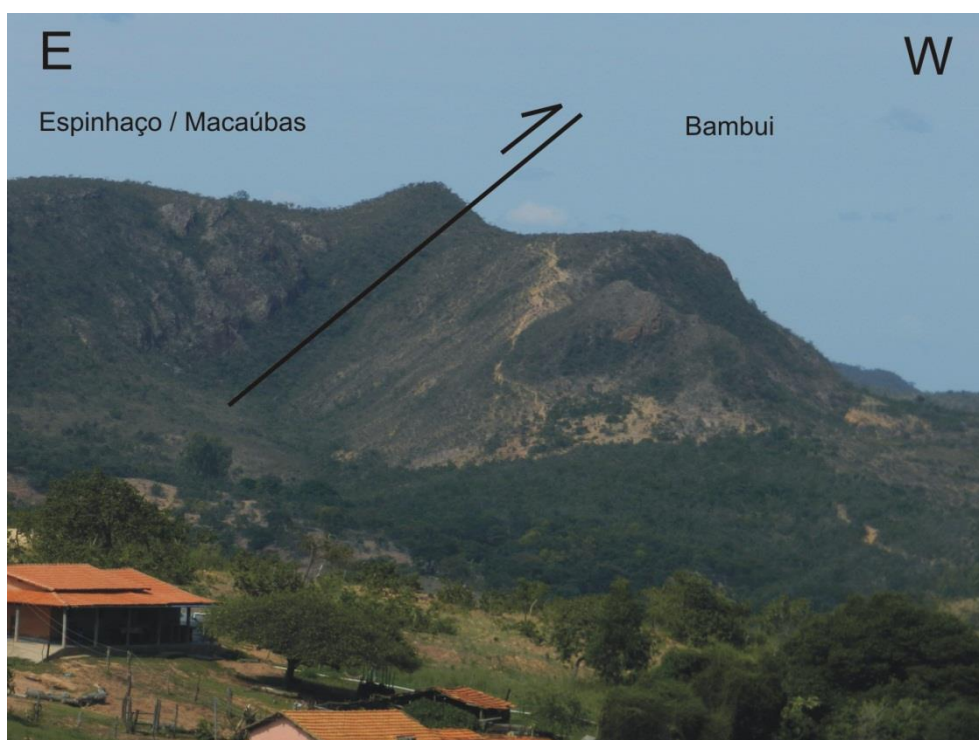


Figura 4.13: Seção a leste da área-piloto de Montes Claros mostrando os quartzitos das unidades mais antigas (Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas) jogados por falha de empurrão sobre filitos da unidade mais nova (Grupo Bambuí) (pontos V-08 e 09).



Figura 4.14: Metassiltitos do Grupo Bambuí mostrando relação de quase ortogonalidade entre o acamamento sedimentar (S0) e a clivagem ardósiana (S1) (V-006P).



Figura 4.15: Falha de empurrão separando duas fácies distintas dos calcários do Grupo Bambuí (BR-135, Ponto V-37).

Os dados de atitude de acamamento de rochas do Grupo Bambuí quando lançados em estereograma mostram uma concentração de polos em torno da posição sub-horizontal, porém sugerindo uma guirlanda de círculo máximo, com eixo de dobramento inferido em N018E sub-horizontal, coincidente com a orientação dos eixos de dobras medidos no campo (Figura 4.16).

Os dados de clivagem ardosiana nessa mesma unidade quando lançados em estereograma mostram uma concentração uniaxial, com plano médio de atitude 115/55 (N025E/55SE) (Figura 4.17). As lineações de estiramento lançadas neste mesmo diagrama mostram uma atitude *down-dip* (no rumo do mergulho) com relação à clivagem ardosiana.

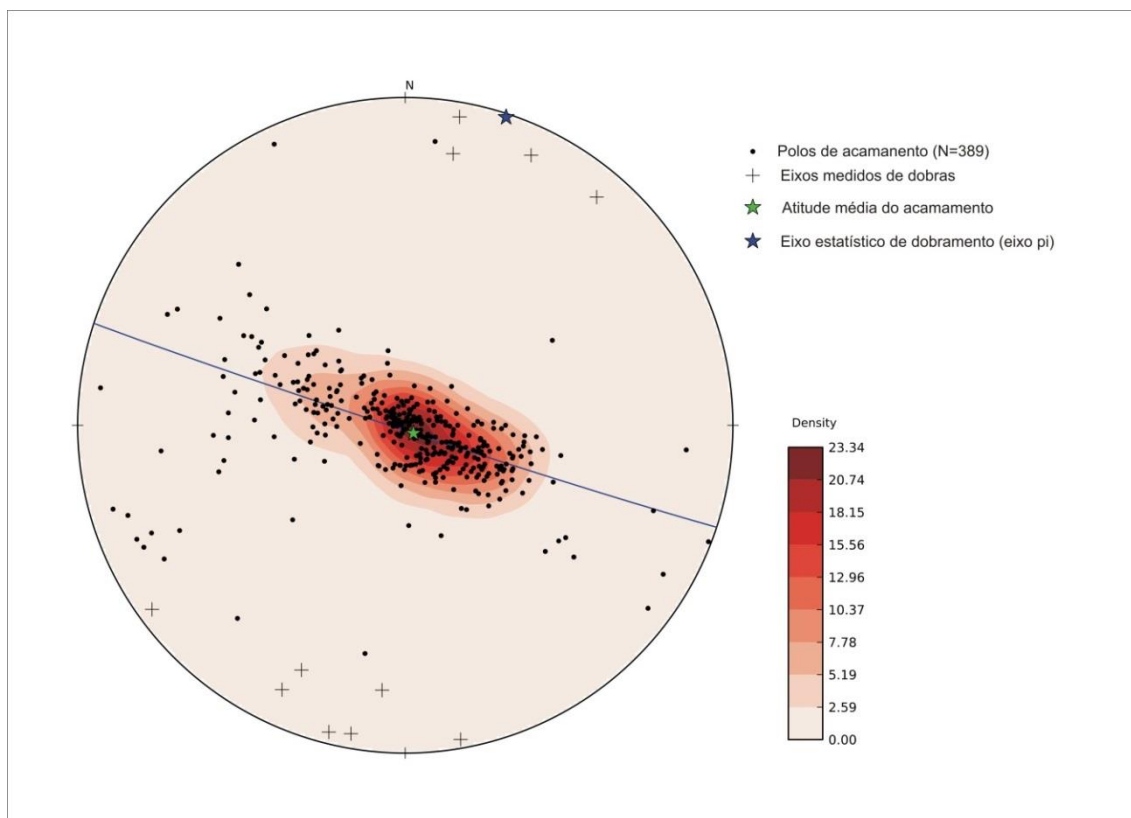


Figura 4.16: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar e eixos de dobras do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).

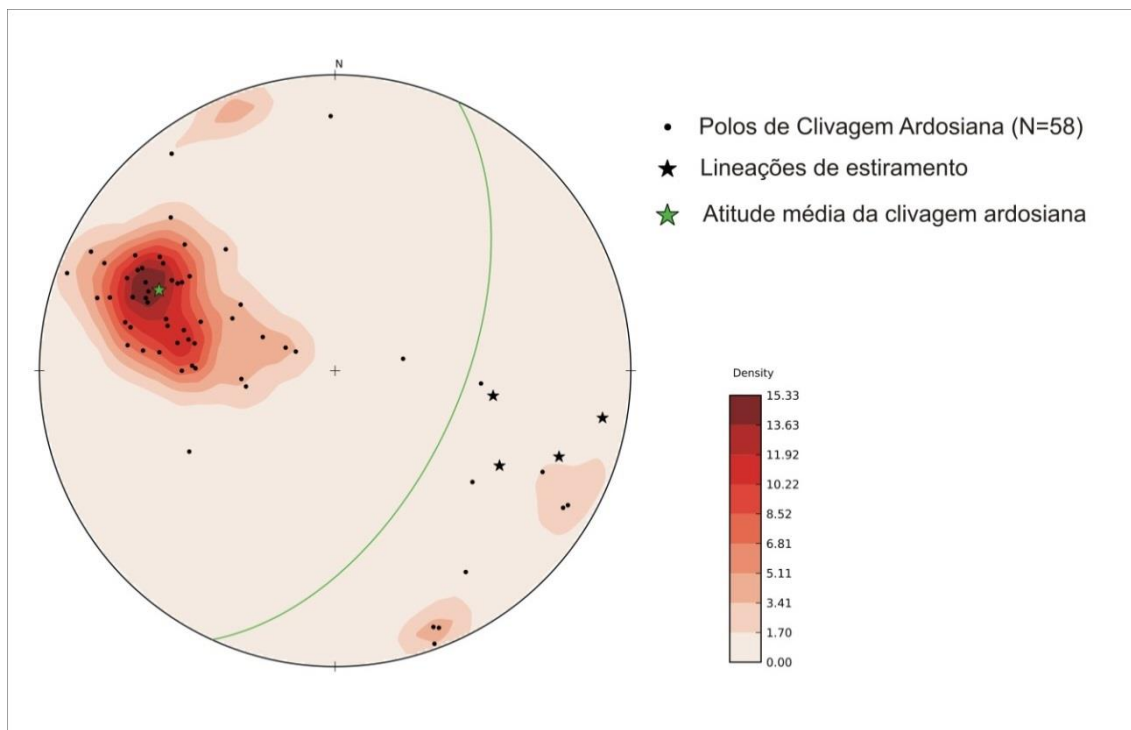


Figura 4.17: Estereograma mostrando os polos de clivagem ardosiana e lineações de estiramento do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).

Esse conjunto de dados corrobora o arcabouço estrutural regional do Grupo Bambuí na área, caracterizado por dobramentos abertos com eixos sub-horizontais NNE, associados a empurrões com vergência em direção à área estável do Cráton do São Francisco, por exemplo, com vergência e transporte tectônico para WNW.

4.2.2 Análise do fraturamento

No estereograma da Figura 4.16 estão plotadas todas as fraturas medidas na área piloto da Bacia do Rio do Vieira. Essas mesmas estruturas estão representadas em diagrama de rosácea na Figura 4.18.

Nesses diagramas observam-se quatro famílias principais de fraturas:

- Família 1 - 150/88 (N060E/88NW);
- Família 2 - 300/84 (N030E/84SE);
- Família 3 - 060/82 (N030W/82SW);
- Família 4 - 195/86 (N075W/86NE).

São todas famílias sub-verticais, perpendiculares, portanto, à atitude média do acamamento. As famílias 1 e 2 parecem ser condicionadas pela atitude da clivagem tectônica e falhas de empurrão, enquanto que as famílias 3 e 4 são a elas perpendiculares.

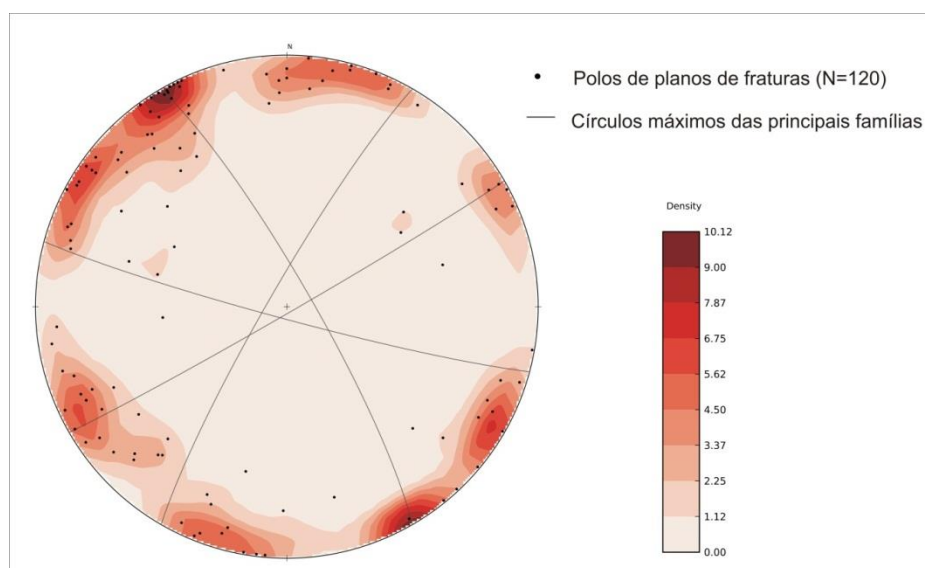


Figura 4.18: Estereograma mostrando as fraturas em rochas do Grupo Bambuí (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).

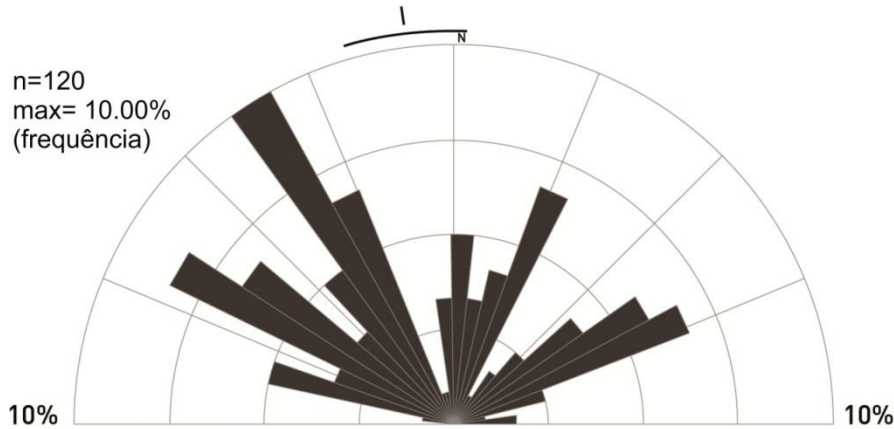
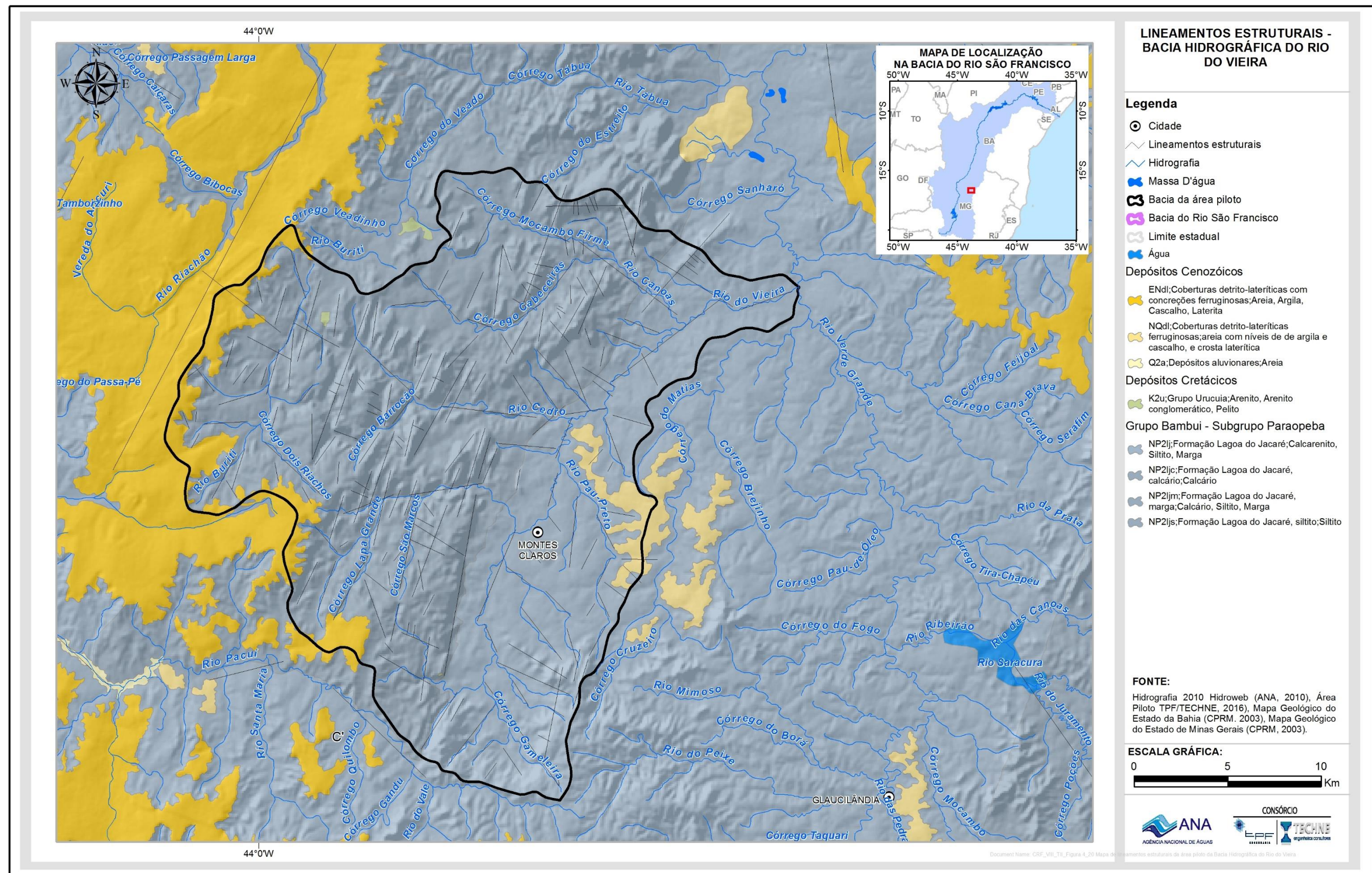


Figura 4.19: Diagrama rosácea mostrando a direção das fraturas sub-verticais afetando rochas do Grupo Bambuí.

4.2.3 Lineamentos estruturais

Na Figura 4.20 tem-se o mapa de lineamentos estruturais da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. Podem ser observados dois padrões de direções preferenciais identificados pelos lineamentos, NNE/SSW, NW/SE, esse segundo bem marcado pela drenagem periférica da área.

O padrão de lineamento NNE/SSW pode ser observado nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré, na região do Parque Estadual da Lapa Grande, que na sua grande maioria os calcários seguem essa mesma direção preferencial.



4.2.4 Eventos sísmicos em Montes Claros e o sistema de esforços regional

O Centro de Sismologia da Universidade de São Paulo (IAG/SP), em parceria com o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (Obsis/UnB), relatam registros de abalos sísmicos na região desde 1995. Há, porém, relato de um tremor ocorrido em 1978 na própria cidade de Montes Claros (Rocha & Oliveira, 2014).

Uma rede de nove estações sismográficas implantadas pelas universidades mostrou que os eventos se concentraram em duas pequenas áreas no noroeste da cidade. A principal atividade ocorre em um falhamento inverso de direção NNW mergulhando para ESE. As profundidades dos focos variam de cerca de 1 a 2 km, provavelmente no embasamento do Grupo Bambuí (Figura 4.20). O mecanismo é focal e coerente com o campo de esforços regional, apresentando a maior compressão (σ_1) aproximadamente E-W (Figura 4.21).

As fraturas de qualquer origem e idade podem ser potencialmente abertas ou fechadas conforme sua orientação com relação ao sistema de esforços atuantes. Em tese, as fraturas perpendiculares a σ_3 (menor esforço compressivo) e, portanto, paralelas a σ_1 e σ_2 , são as potencialmente abertas.

Deste modo, o campo de esforços atual determinado pelo mecanismo focal dos sismos implica que as fraturas potencialmente abertas devem ter direção em torno de E-W, devendo ser as mais favoráveis ao fluxo de água subterrânea.

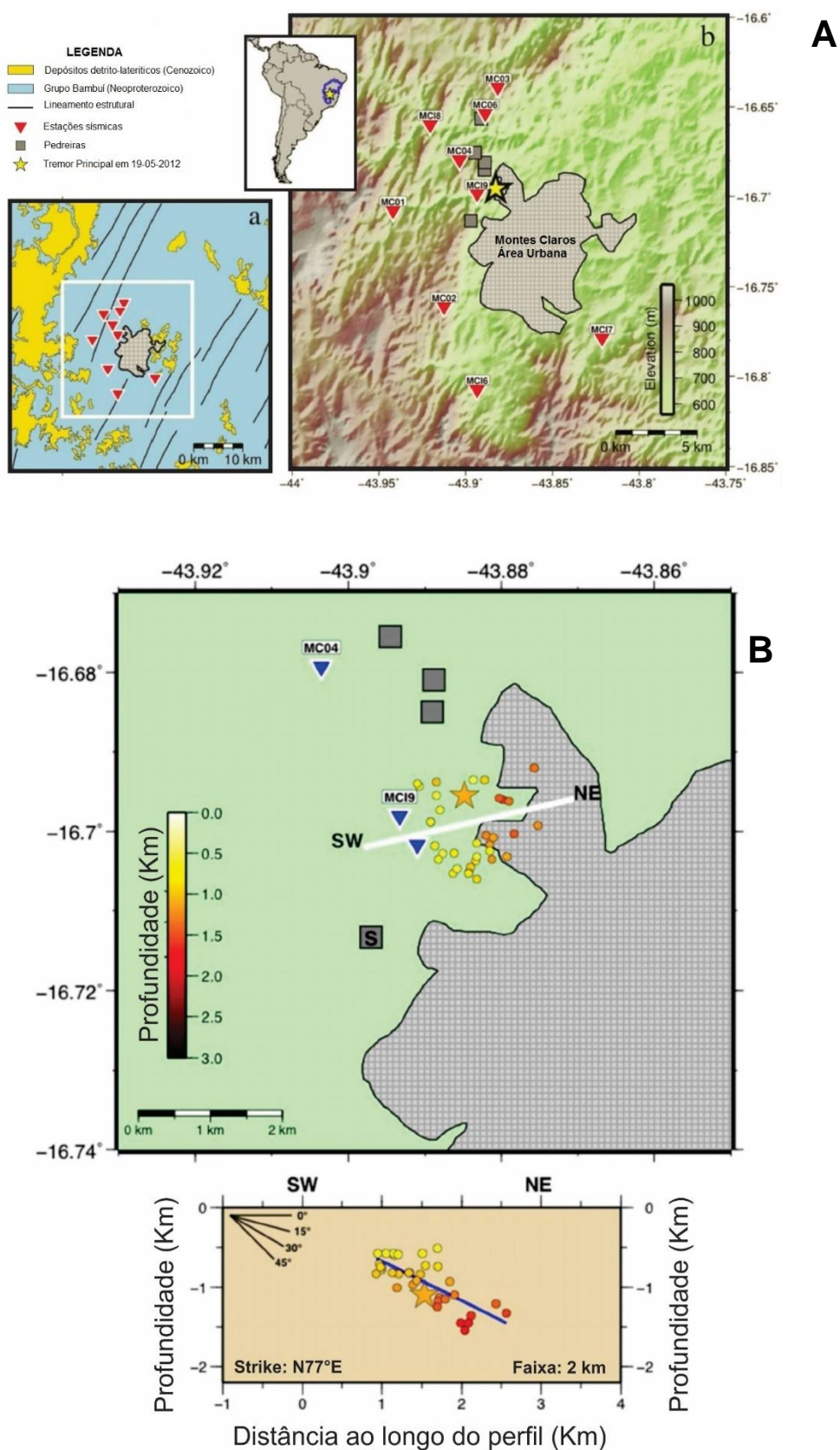


Figura 4.21: Mapa (A) e seção (B) mostrando a sismicidade natural na região de Montes Claros (Agurto-Detzel *et al.*, 2015).

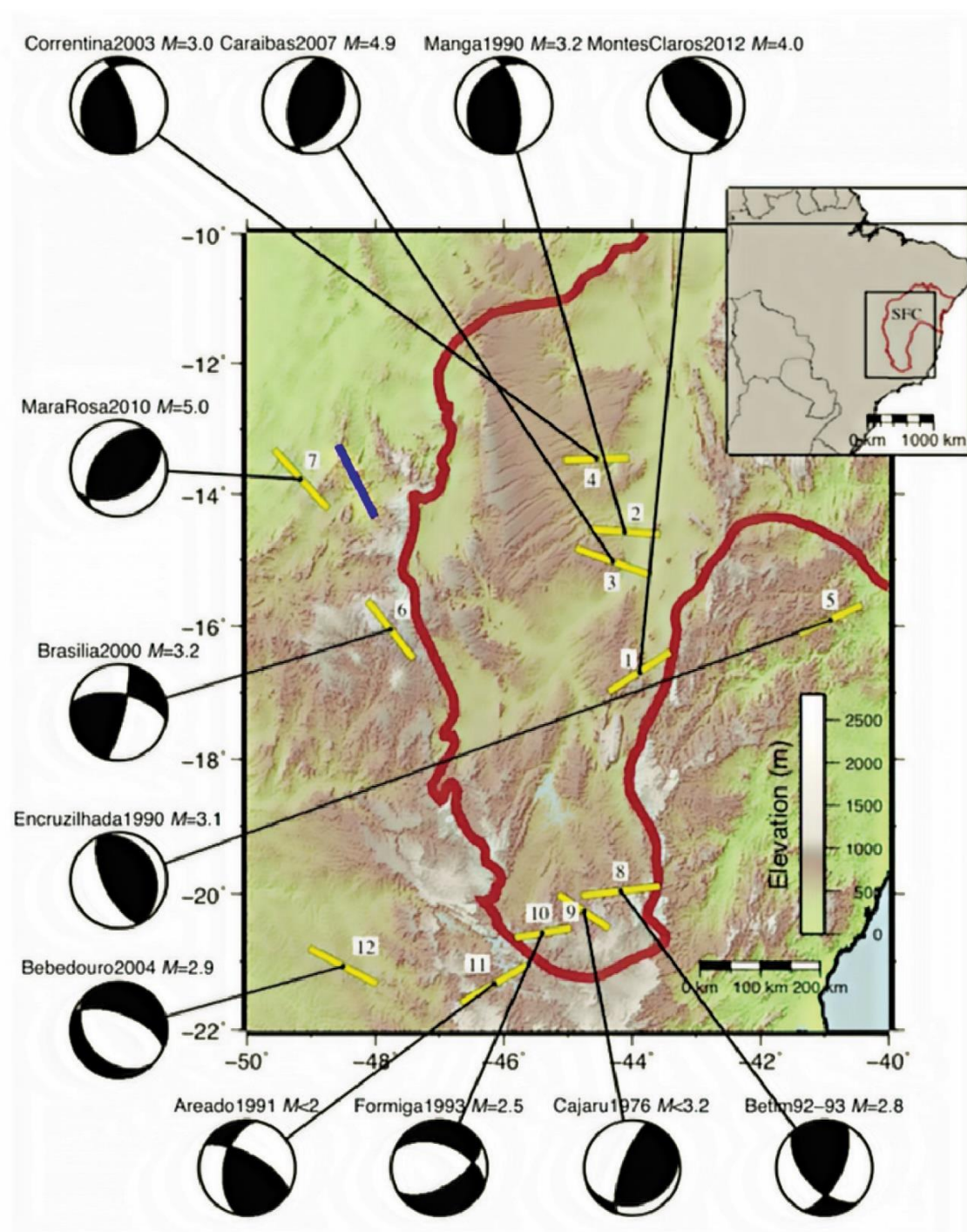


Figura 4.22: Direções principais de esforços máximos compressivos (barras amarelas) na região do Cráton do São Francisco, determinadas pelos mecanismos focais de sismos naturais (Agurto-Detzel *et al.*, 2015).

4.3 Feições cársticas

O processo de carstificação das rochas carbonáticas se dá pela passagem de água contendo dióxido de carbono através dessas e está diretamente relacionado com a composição química e a porosidade das mesmas, além de ser afetado por fatores físico-químicos e biológicos do ambiente em que tais rochas estão inseridas. Grandes quantidades de água podem ser armazenadas nas fissuras e espaços vazios, podendo dar origem a um complexo sistema tridimensional de condutos de dissolução, que constituem o aquífero cárstico.

Segundo Boegli (1980), no domínio das formas exocársticas prevalecem às feições negativas, como poliés², uvalas e dolinas, em contraposição às formas positivas, como maciços, torres e verrugas. Formas recentes, de pequena dimensão, como os lapiás também aparecem na superfície. As formas endocársticas são dominadas por condutos ou cavernas que podem ser decoradas por exuberantes espeleotemas, tais como colunas, cortinas, estalactites e estalagmites.

4.3.1 Parque Estadual da Lapa Grande

O Parque Estadual da Lapa Grande (PELG) está localizado no município de Montes Claros e abrange grande parte da região oeste da área piloto. O parque foi criado em 2006 com uma área de aproximadamente 8 mil hectares, sendo prevista uma ampliação para 15 mil hectares (Figura 4.23). A região se posiciona entre as altitudes 680 m e 1.028 m, com relevo condicionado por feições de exocarste, tais como: maciços, dolinas, sumidouros e ressurgências, arcos, pontes e torres (Barbosa *et al.*, 2005).



Figura 4.23: Limites do Parque Estadual da Lapa Grande. (Fonte: IEF/MG).

O PELG tem como uma de suas funções proteger todo o patrimônio espeleológico da região. A importância maior do PELG, entretanto, reside no

² Planícies cársticas

seu papel de área de recarga do aquífero cárstico e, também, no fato de abrigar importantes mananciais de superfície, utilizados no abastecimento público de Montes Claros (Figura 4.24).



Figura 4.24: Mananciais do Parque da Lapa Grande/MG. (Fonte: IEF/MG)

A Lapa Grande, no parque, primeira gruta aberta à visitação, destaca-se pelo fácil acesso, pelo tamanho (2,2 km de comprimento) e beleza. Nela ocorre um trecho subterrâneo de um afluente do Córrego Lapa Grande, tendo em sua entrada uma ressurgência. Destacam-se ainda as lagoas intermitentes formadas nas diversas dolinas em seu interior (Figura 4.25). Essa área encontra-se em constante modificação devido aos diversos processos, dentre eles a carstificação, atuantes nas rochas calcárias da região do parque e entornos. Durante a visitação, pode-se observar pelo menos três fácies distintas da Formação Lagoa do Jacaré (calcário), conforme descrito no capítulo anterior.

Outro sistema hidrogeológico de grande importância é a Lapa D'Água onde uma das entradas, apresenta um sumidouro do Córrego São Marcos que segue subterrâneo por trecho ainda não conhecido. Destaca-se ainda que, o Córrego Lapa Grande possui um sumidouro a cerca de 750 m antes da entrada da Lapa D'Água (Barbosa, 2005) (Figuras 4.26 e 4.27). Dentre as diversas cavernas que compõem o PELG, destacam-se, além das duas citadas anteriormente, a Lapa Pintada (Figura 4.28) e a Lapa Claudina.

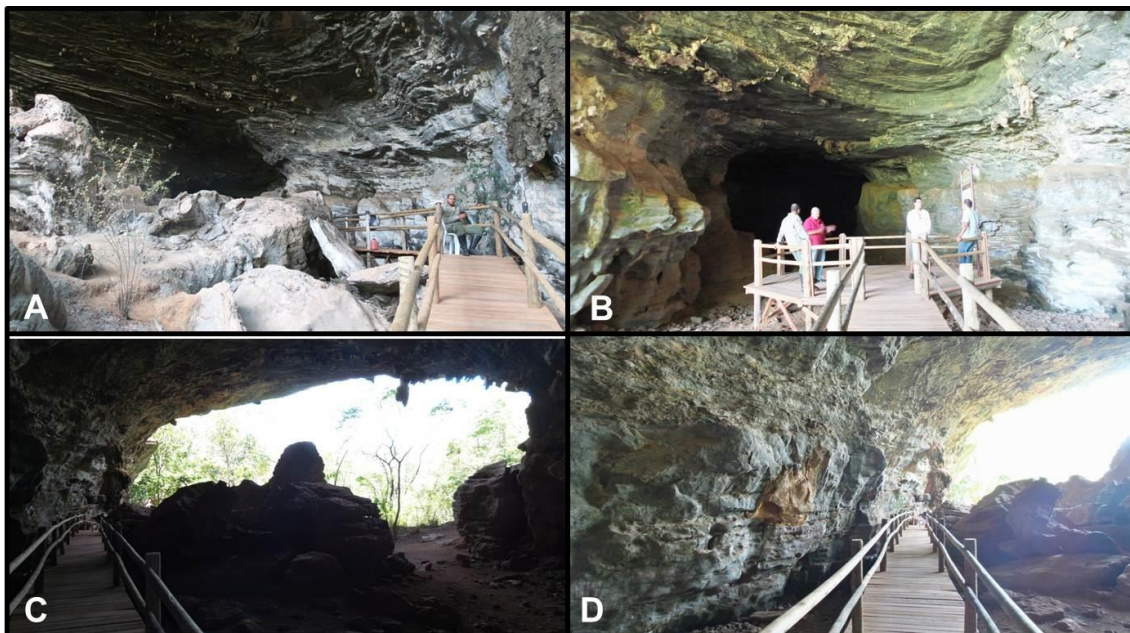


Figura 4.25: A, B, C, D – V-205P – Parque Estadual da Lapa Grande. Calcários cinza maciço na base, e calcários laminados e com granodecrescência ascendente para o topo.



Figura 4.26: Exemplares de espeleotemas, Lapa D'Água. (Fonte: Acervo PELG)

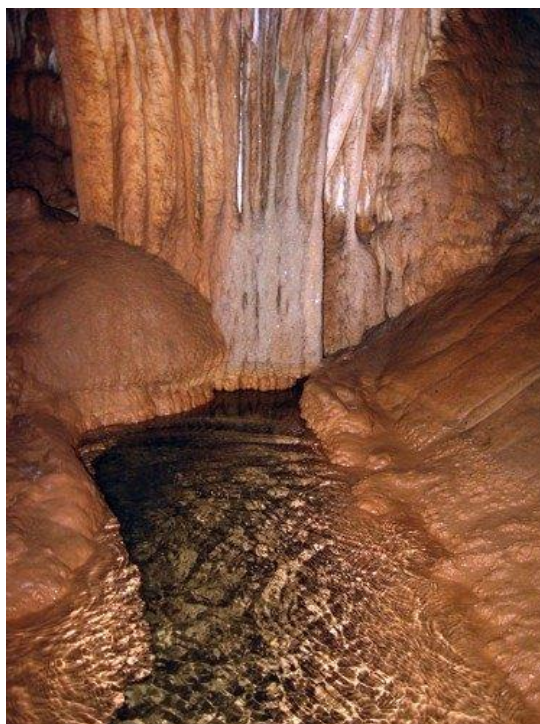


Figura 4.27: Interior da Lapa D'Água. (Fonte: Marcelo A. Neves)



Figura 4.28: Lapa Pintada possui uma forma semicircular e diversas pinturas. (Fonte: Acervo Eduardo Gomes)

As cercanias do Parque Estadual da Lapa Grande são particularmente interessantes para a espeleologia. O carste de Montes Claros, com efeito, não fica circunscrito a esse parque, mas, ocorre em todo o seu entorno. Cita-se como exemplo a Lapa do Andorinão (Figuras 4.29 e 4.30), que exhibe um patrimônio espeleológico bastante significativo.

Predominam, no carste de Montes Claros, os alinhamentos NE, tanto das formas cársticas positivas (maciços), como das negativas (dolinas, uvalas e lagoas cársticas). Essa constatação sugere que o fraturamento predominante na região tem direção NE.

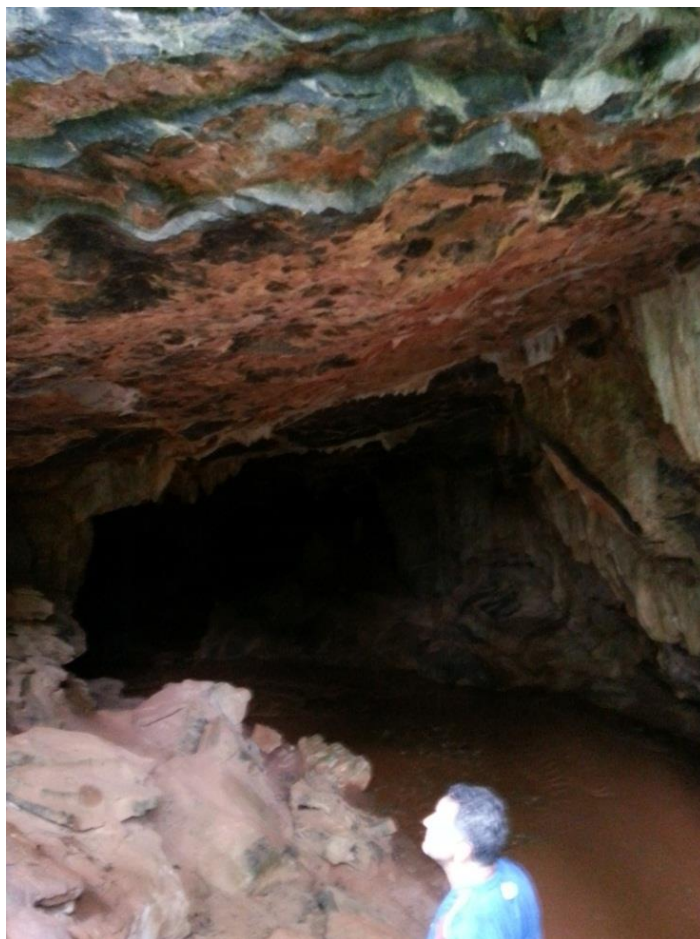


Figura 4.29: Vista geral da entrada da gruta.



Figura 4.30: Lapa do Andorinão, próximo ao distrito de Santa Bárbara. No entorno do PELG.

Fonte: <http://www.dubaiaparthotel.com.br/application/index/turismo/id/9>.

4.3.2 Lagoa da Tiririca

A Lagoa da Tiririca, nascente do rio Riachão, destaca-se pela sua imensurável beleza, com águas transparentes e de coloração azulada. Localizada numa reserva ambiental, protegida pelos órgãos ambientais responsáveis, seu acesso é bem restrito. A Lagoa da Tiririca encontra-se na região norte de Montes Claros, às margens do limite da área piloto, no distrito de Nova Esperança (Figura 4.31). Sua localização é um tanto peculiar, por estar situada em um terreno plano, na cota de 700 metros.



Figura 4.31: Lagoa da Tiririca, distrito de Nova Esperança/MG.

4.3.3 Outras estruturas de carstificação

Na porção NW da área piloto, em zona de afloramento dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior e nas proximidades de uma extensiva cobertura detrito-laterítica, destaca-se um sistema cárstico representado por um conjunto de dolinas e cavidades, controlado por um lineamento estrutural SW-NE (Figura 4.32). Diferencia-se na Figura 4.32 a presença de dolinas mapeadas como pontos (amarelos) e como polígonos (vermelho). Os polígonos referem-se às áreas rebaixadas maiores que puderam então ser consideradas como diversas dolinas aglutinadas, indicando zonas de dissolução que poderiam indicar um ambiente de desenvolvimento de dolinamentos muito próximos, ou seja, um agrupamento de dolinas, enquanto que os pontos denotam a presença de dolinas não mapeáveis na escala de trabalho.

Observa-se ainda, na Figura 4.32, um grande número de dolinas na área do aeroporto, nas proximidades de uma mancha de depósitos aluvionares. Essas dolinas, juntamente com um conjunto de cavernas e sumidouros no extremo noroeste da área piloto, parecem fazer parte de um alinhamento NW-SE de feições cársticas. Esse alinhamento NW-SW foi enfatizado pela eletrorresistividade, conforme será visto no item 5.2 adiante.

5. GEOFÍSICA

Os estudos geofísicos na área piloto da Bacia do Rio Vieira foram realizados através da aplicação do método gravimétrico e do método de eletrorresistividade. O primeiro visou a uma investigação mais profunda, em busca de grandes estruturas, da espessura do Grupo Bambuí e da natureza do seu substrato. O segundo se ateve às porções mais superficiais do Grupo Bambuí, buscando informações sobre a zona aquífera desse grupo.

5.1 Gravimetria

O método gravimétrico tem aplicações importantes nos estudos das bacias sedimentares para a exploração de hidrocarbonetos e na compreensão da estrutura da crosta de grandes segmentos litosféricos. Tem também uma aplicação nobre na prospecção de jazidas de minerais metálicos e na delimitação do arcabouço de bacias sedimentares. A importância da gravimetria na pesquisa de água subterrânea é comparável ao seu uso na prospecção de petróleo. A identificação de falhas verticais e de espessamentos sedimentares é um processo rotineiro e de fácil compreensão na aplicação do método, embora muitas vezes envolvendo ambiguidades. A identificação de depressões tectônicas em bacias sedimentares tem uma importância fundamental na delimitação de aquíferos porosos, e consequentemente, na sua modelagem e na locação de poços.

O estudo gravimétrico constou da realização de 25 estações gravimétricas distribuídas regularmente na área. A obtenção das medidas de campo, nessas estações, foi realizada no período de 02 a 27 de julho de 2014.

Na Figura 5.1 é mostrada a posição das estações gravimétricas enquanto que na Tabela 5.1 são mostradas suas coordenadas.

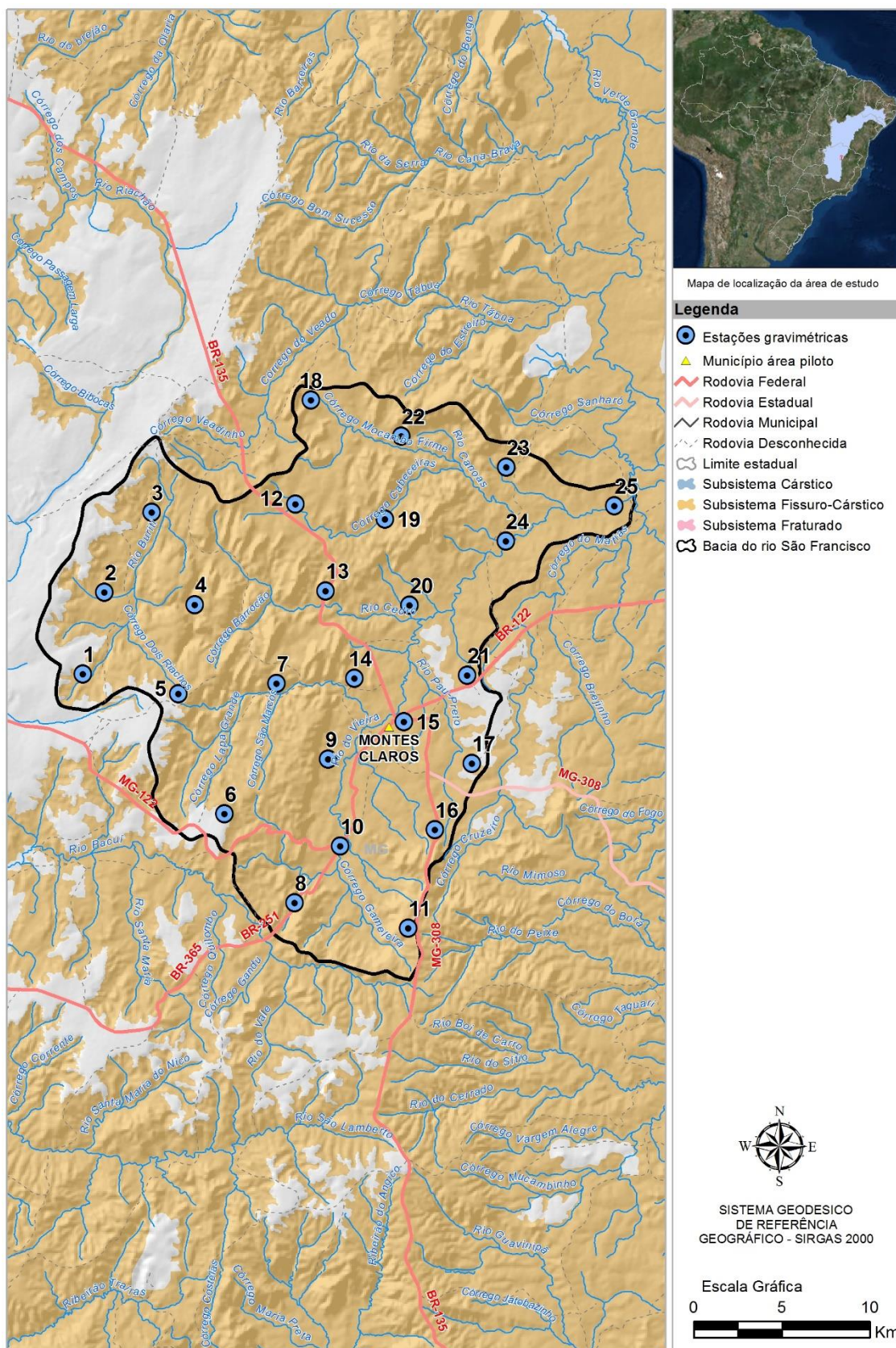


Figura 5.1: Posição das estações gravimétricas na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio Vieira

Tabela 5.1 – Coordenadas das estações gravimétricas

ESTAÇÃO	ZONA	LONGIT. UTM	LATID. UTM
V01	23K	604043.00 m E	8153524.00 m S
V02	23K	605238.00 m E	8157677.00 m S
V03	23K	608177.00 m E	8162313.00 m S
V04	23K	610359.00 m E	8156799.00 m S
V05	23K	609411.00 m E	8152177.00 m S
V06	23K	612085.00 m E	8145935.00 m S
V07	23K	614718.00 m E	8152629.00 m S
V08	23K	615859.00 m E	8141025.00 m S
V09	23K	617525.00 m E	8148709.00 m S
V10	23K	618064.00 m E	8143794.00 m S
V11	23K	621797.00 m E	8139658.00 m S
V12	23K	615638.00 m E	8162676.00 m S
V13	23K	617387.00 m E	8157859.00 m S
V14	23K	618965.00 m E	8153069.00 m S
V15	23K	621790.00 m E	8149994.00 m S
V16	23K	623630.00 m E	8145197.00 m S
V17	23K	625512.00 m E	8148468.00 m S
V18	23K	616652.00 m E	8168253.00 m S
V19	23K	620446.00 m E	8161491.00 m S
V20	23K	621820.00 m E	8157183.00 m S
V21	23K	624836.00 m E	8153677.00 m S
V22	23K	621245.00 m E	8166227.00 m S
V23	23K	627215.00 m E	8164141.00 m S
V24	23K	627081.00 m E	8160162.00 m S
V25	23K	632805.00 m E	8162510.00 m S

5.1.1 Considerações gerais sobre o método gravimétrico

A aplicação da gravimetria na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira obedeceu a três etapas distintas, descritas a seguir:

5.1.1.1 Processamento

Anomalia Bouguer completa

Os levantamentos gravimétricos são baseados nas variações do campo gravimétrico terrestre que, por sua vez, são provocadas por diferenças de densidade entre as rochas em profundidade. Portanto, o objetivo desses levantamentos é constatar a presença de anomalias do campo terrestre e associá-las às suas causas: corpos pontuais em profundidade, descontinuidade de estruturas, contatos geológicos, etc. Para distinguir essas anomalias, os dados obtidos em campo devem ser corrigidos de diversas influências neles incorporadas no ato da aquisição.

O mapa de Anomalia *Bouguer* Completa representa o mapa de anomalias gravimétricas obtido após as correções de pré-processamento. Essas correções são as seguintes: maré luni-solar, deriva instrumental, correções da gravidade normal, de ar-livre, de *Bouguer* simples e de terreno.

Filtragens regional e residual

A priori, o método da gravimetria não possui um limite de profundidade de investigação. Assim, o mapa de Anomalia *Bouguer* Completa é composto pela contribuição do sinal gravimétrico de diversas fontes em diferentes profundidades. Por essa razão, o primeiro passo da interpretação dos dados gravimétricos consiste em separar o sinal gravimétrico associado às fontes rasas (de interesse exploratório) das anomalias de origem mais profunda, de dimensões crustais. Esse procedimento é denominado Filtragem Regional-residual que, no presente caso, foi realizada através da utilização da técnica denominada de Espectro de Potência.

Anomalias em grandes profundidades geram sinais gravimétricos de grandes comprimentos de onda, enquanto que anomalias mais superficiais são associadas a comprimentos de onda menores. Essa diferenciação no comprimento de onda permite separar as anomalias gravimétricas de interesse exploratório das anomalias geradas por fontes mais regionais. Essa separação tem caráter mais quantitativo que qualitativo, oferecendo, portanto, uma boa precisão. Os mapas gerados após as filtragens regional e residual são denominados de:

- Mapa *Bouguer* regional: referente às anomalias gravimétricas mais profundas e de escala regional;
- Mapa *Bouguer* residual: contendo as anomalias gravimétricas mais superficiais isoladas após a filtragem.

Uma vez isoladas as anomalias de interesse, os procedimentos de interpretação geológica consideram, normalmente, apenas o mapa residual.

➤ Realce das anomalias

As técnicas de realce das anomalias gravimétricas utilizadas nessa interpretação foram as seguintes: cálculo das derivadas horizontais e cálculo da derivada vertical. A utilização do cálculo de derivadas horizontais tem como principal objetivo auxiliar na localização de falhas e contatos verticais entre blocos com contrastes de densidades significativos. Para falhas sub-verticais, os mapas de derivadas horizontais (nas direções x e y) apresentam picos (valores máximos) do gradiente do campo gravimétrico sobre as descontinuidades detectadas. O mapa de derivadas verticais (em z), por sua vez, destaca o comportamento estrutural observado na área. Neste mapa, fortes gradientes gravimétricos sugerem grandes contrastes de densidade, enquanto que menores gradientes gravimétricos traduzem áreas com menores contrastes de densidade.

O corte mostrado na Figura 5.2 apresenta o comportamento das derivadas horizontais (A) e vertical (B), obtidos a partir de modelos sintéticos de uma zona de contato entre terrenos com diferentes densidades.

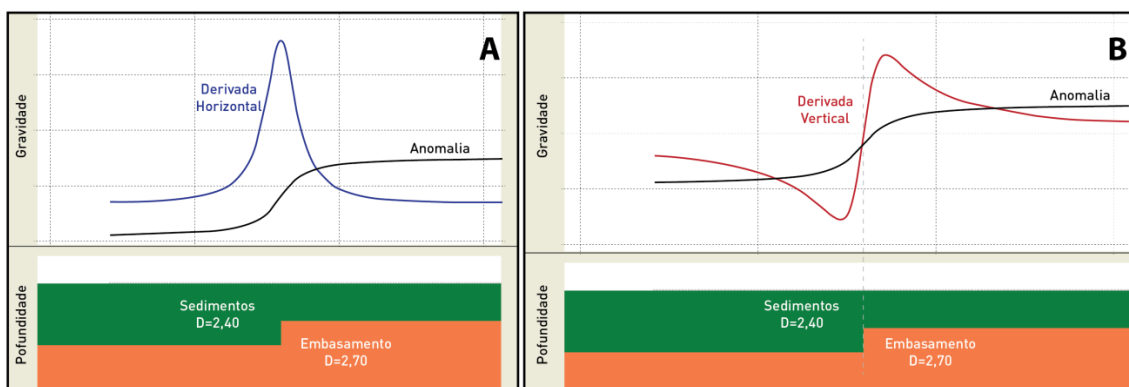


Figura 5.2: Perfil da derivada horizontal (linha azul em A) e vertical (linha vermelha em B) calculados para o perfil gravimétrico (linha preta em A e B) gerado pelo modelo sintético de uma zona de falha.

➤ **Estimativa de profundidades**

A estimativa de profundidades do embasamento foi efetuada a partir da técnica da Deconvolução de Euler. Essa técnica se baseia na equação de Euler, dada pela Equação 5.1:

$$(x - x_0) \frac{\partial M}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M}{\partial z} = \eta(R - M) \quad \text{Equação 5.1}$$

onde x_0 , y_0 e z_0 são as coordenadas da fonte anômala; M a anomalia gravimétrica; R o campo gravimétrico residual e η o índice estrutural.

O índice estrutural representa a medida da taxa de decaimento da anomalia gravimétrica em função da distância entre a fonte e o ponto de medida. Essa medida depende diretamente da geometria da fonte da anomalia gravimétrica.

Para a avaliação das profundidades, foi utilizado o valor 1 para o índice estrutural, e foram introduzidas estruturas fictícias equivalentes tipo *sills* para representar os altos estruturais detectados. O valor 1 para o índice estrutural foi escolhido com base na concepção do embasamento como horizontal ou suavemente ondulado.

A deconvolução de Euler foi aplicada através do *software* Gosoft Oasis Montaj, a partir do algoritmo de deconvolução localizada. Esse cálculo considera que o tamanho da janela utilizada para computar a resposta é definido pelos pontos de inflexão da amplitude do sinal analítico mais próximo aos máximos locais do mapa.

As estimativas de profundidade do embasamento obtidas, juntamente com informações geológicas disponíveis, foram utilizadas como vínculos para as modelagens com geometria 2D e 3D efetuadas. Estes vínculos assumiram que os principais contrastes de densidades na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, decorrem de variações de profundidade do embasamento do Grupo Bambuí.

5.1.2 Modelagem com geometria 2D e 3D

A modelagem da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira foi dividida em duas fases distintas: a primeira considera o ajuste de perfis 2D com orientação norte-sul (Figura 5.7). Esse ajuste foi efetuado admitindo-se a região como composta por camadas lateralmente homogêneas com densidades de $2,75 \text{ g/cm}^3$ para o embasamento cristalino, $2,59 \text{ g/cm}^3$ para a densidade média dos sedimentos que o recobrem e $2,00 \text{ g/cm}^3$ para a porção saturada desses sedimentos. Essas densidades foram assumidas de acordo com valores médios de densidades para cada grupo de rochas, disponíveis na literatura.

Para todos os modelos 2D gerados, são apresentados não apenas a distribuição das camadas em profundidade como o sinal real obtido pela interpolação dos dados amostrados (linha azul) e o sinal gerado pelas camadas sintéticas modeladas (linha vermelha). Quanto mais próximo o comportamento observado entre ambos os perfis, melhor o ajuste do modelo sintético 2D.

A segunda etapa da modelagem consistiu na composição dos modelos 3D das áreas estudadas. Esses modelos foram gerados a partir do ajuste 2D dos perfis N-S e foram compostos com o objetivo de se obter uma melhor visualização do comportamento lateral do embasamento cristalino.

5.1.3 Resultados obtidos

Os resultados obtidos são consubstanciados nos seguintes documentos:

- Mapa de anomalia *Bouguer* completa – Figura 5.3;
- Mapa de anomalia *Bouguer* regional – Figura 5.4;
- Mapa de anomalia *Bouguer* residual – Figura 5.5;
- Mapa de derivadas nas direções E-W, N-S e vertical – Figura 5.6 (A), (B) e (C);
- Modelagens 2D e 3D – Figura 5.7.

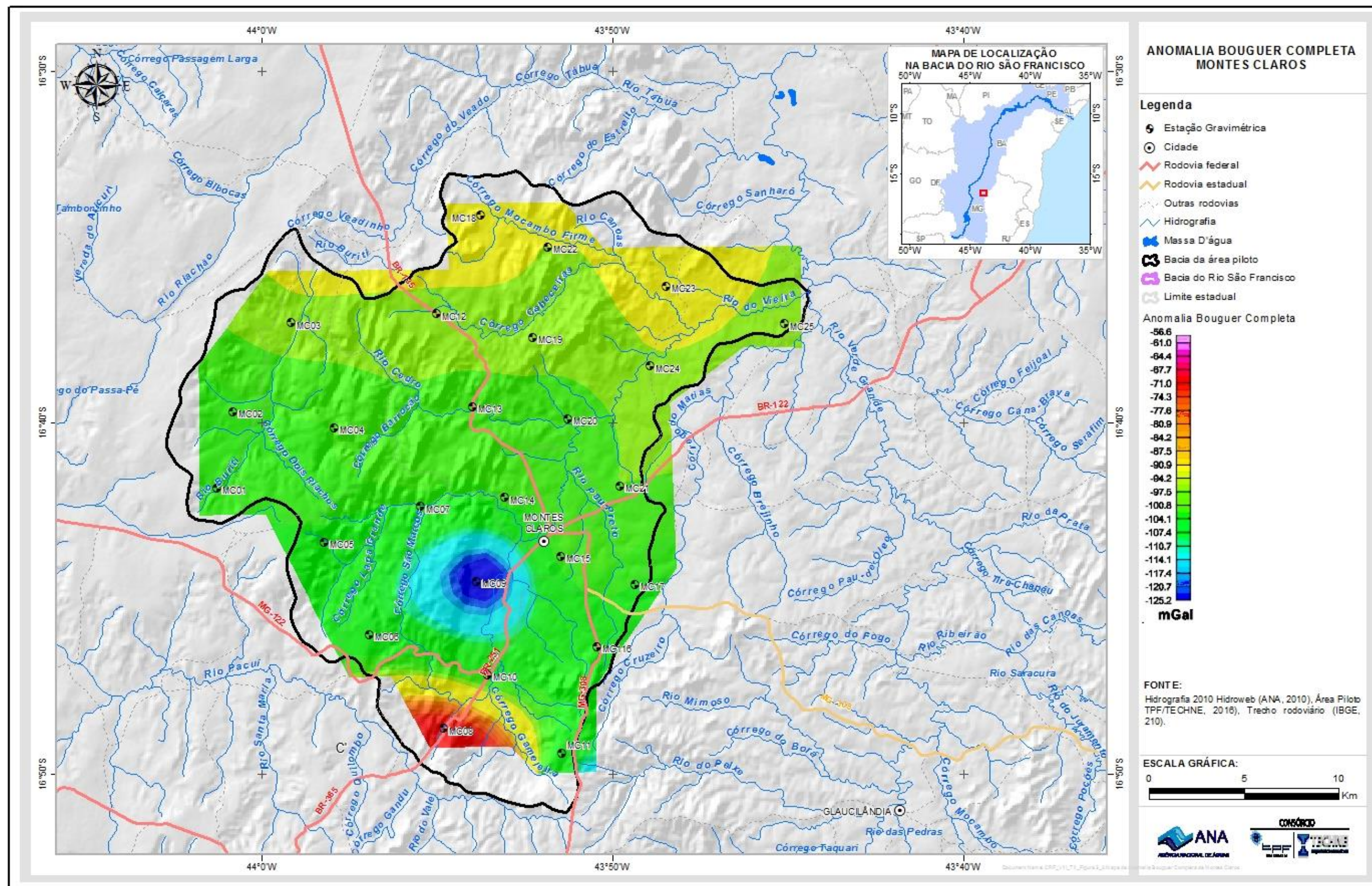


Figura 5.3: Mapa da Anomalia *Bouguer* Completa de Montes Claros (MG).

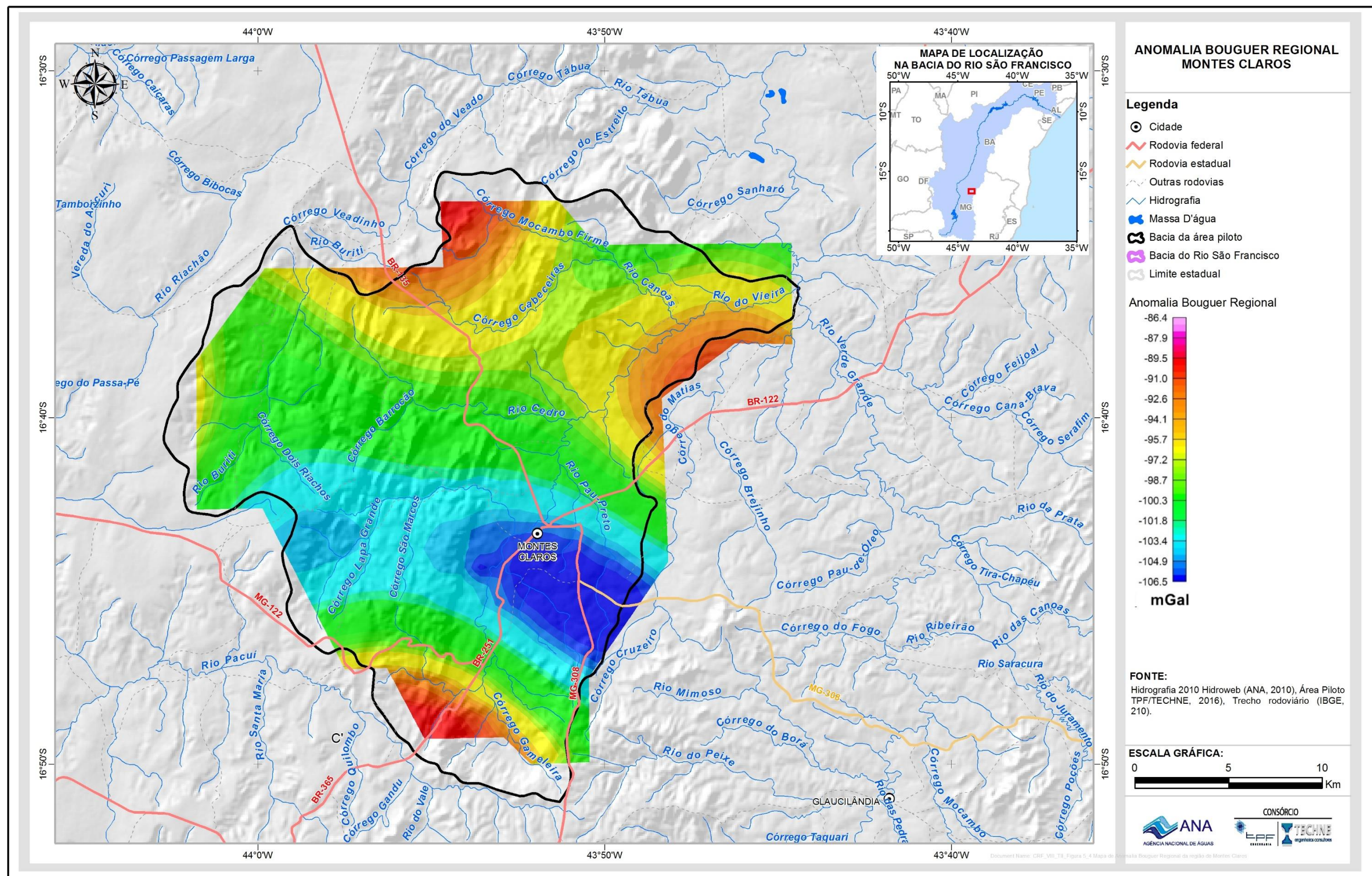


Figura 5.4: Mapa de Anomalia *Bouguer* Regional da região de Montes Claros (MG).

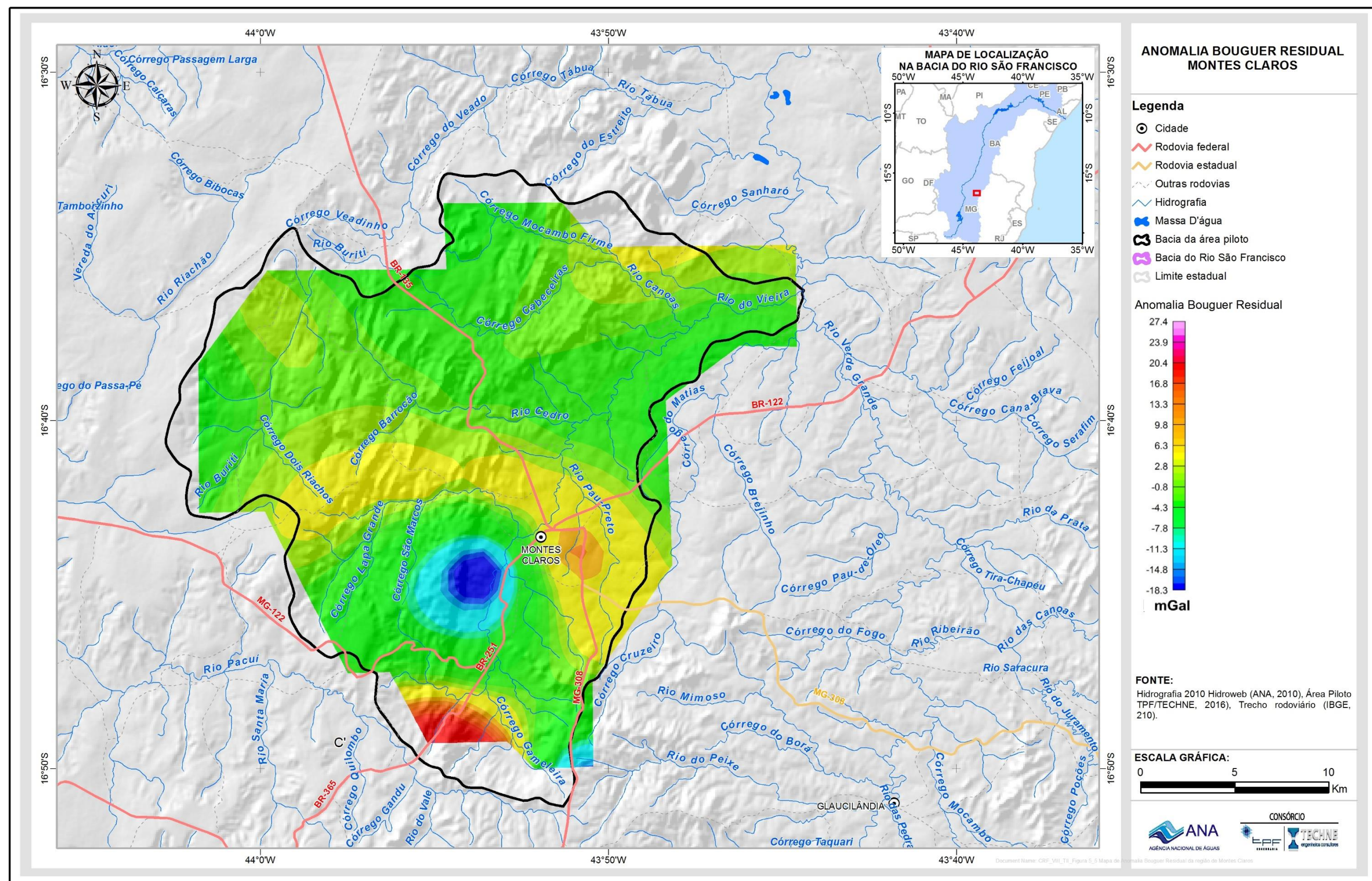


Figura 5.5: Mapa de Anomalia *Bouguer* Residual da região de Montes Claros (MG).

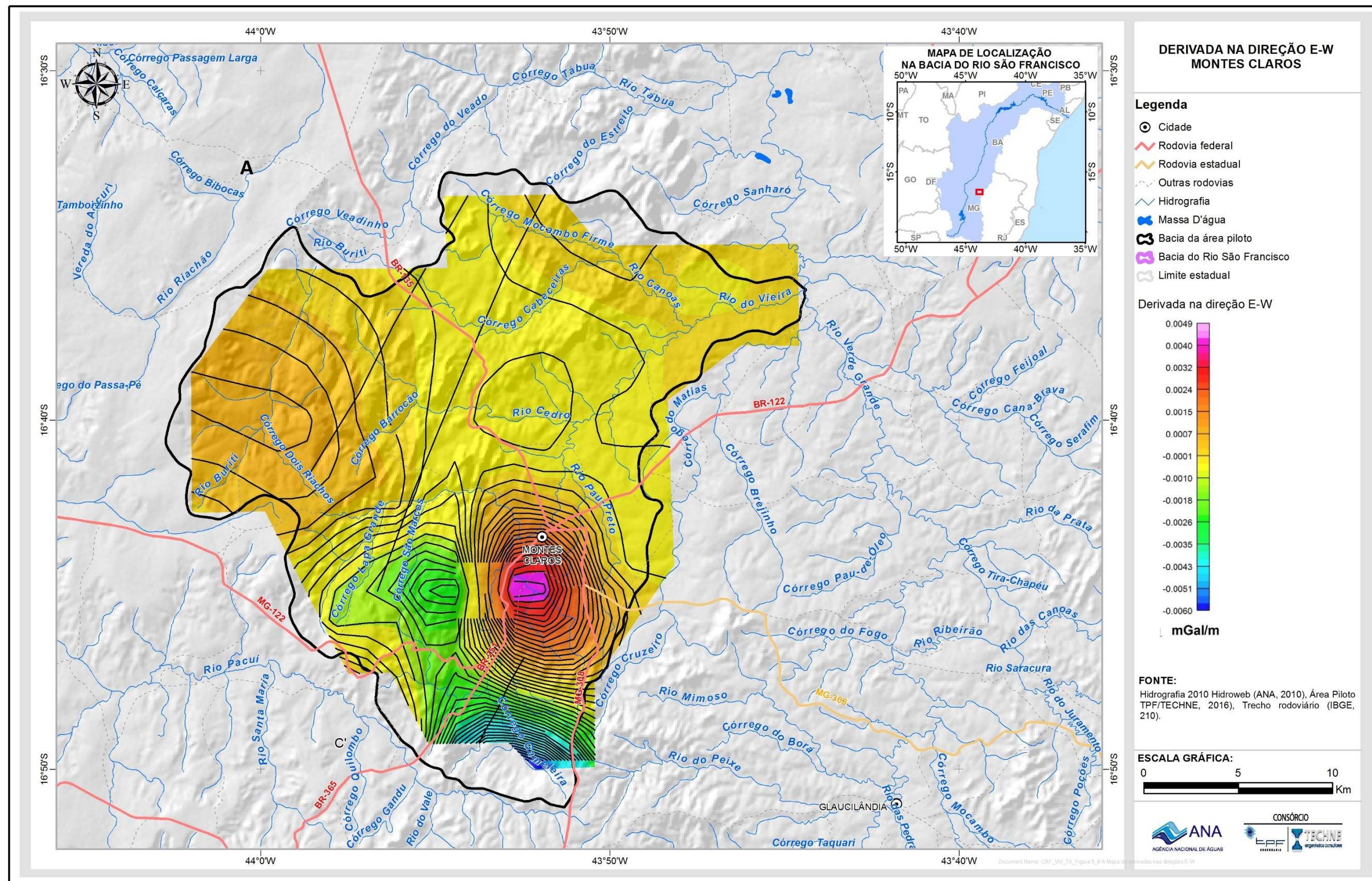


Figura 5.6 (A): Mapa de derivadas nas direções E-W.

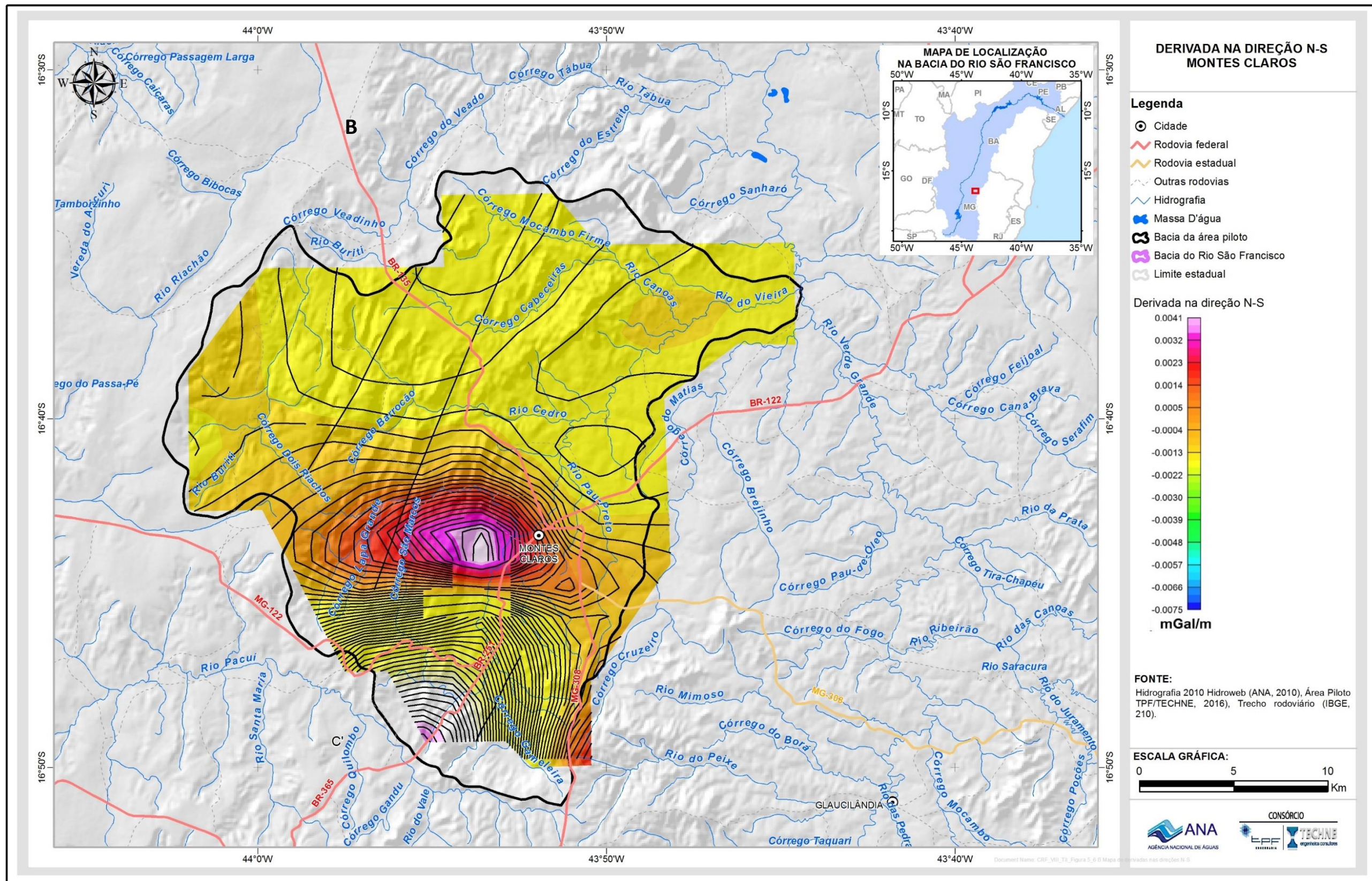


Figura 5.6 (B): Mapa de derivadas nas direções N-S

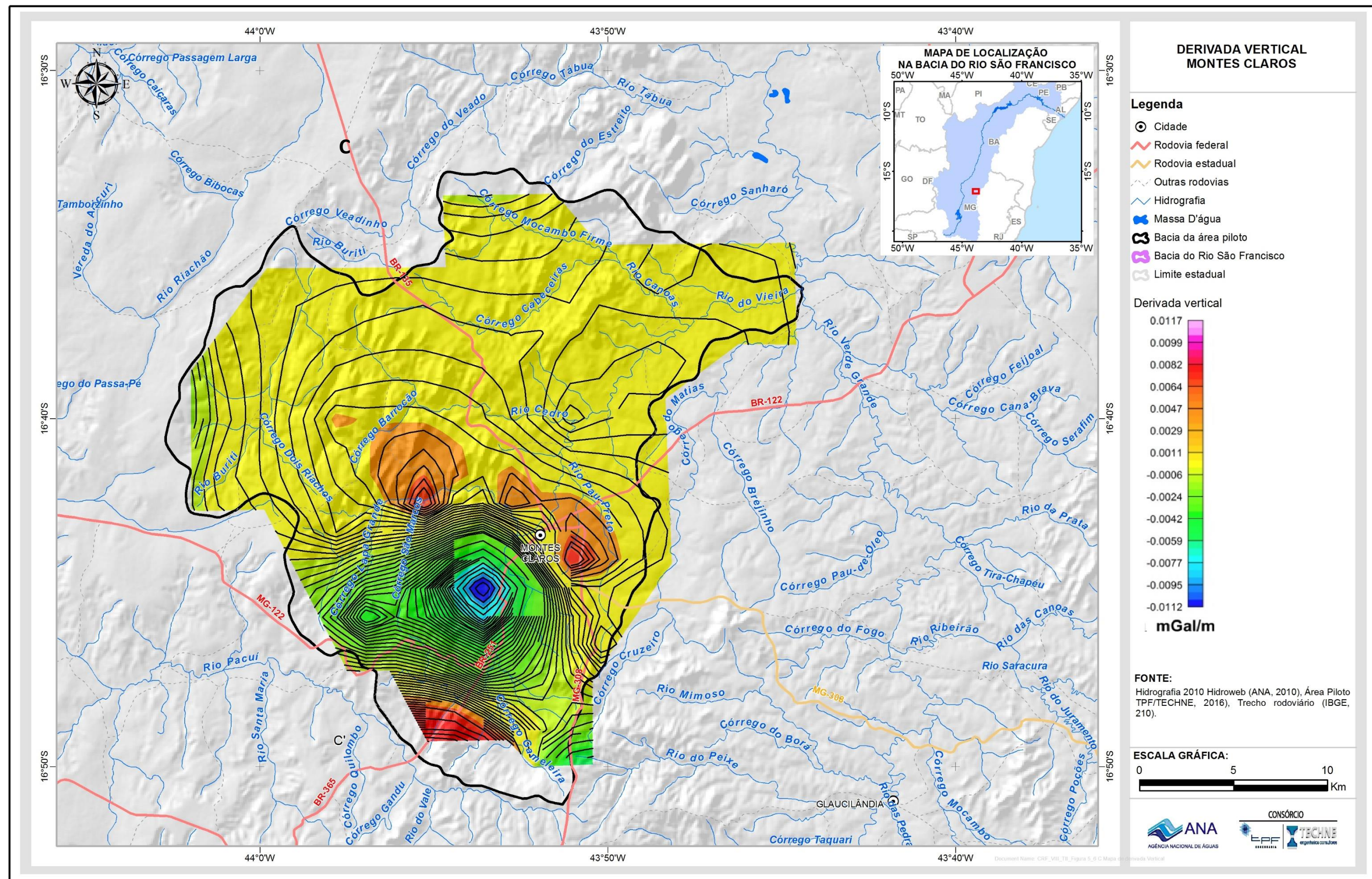


Figura 5.6 (C): Mapa de derivada Vertical

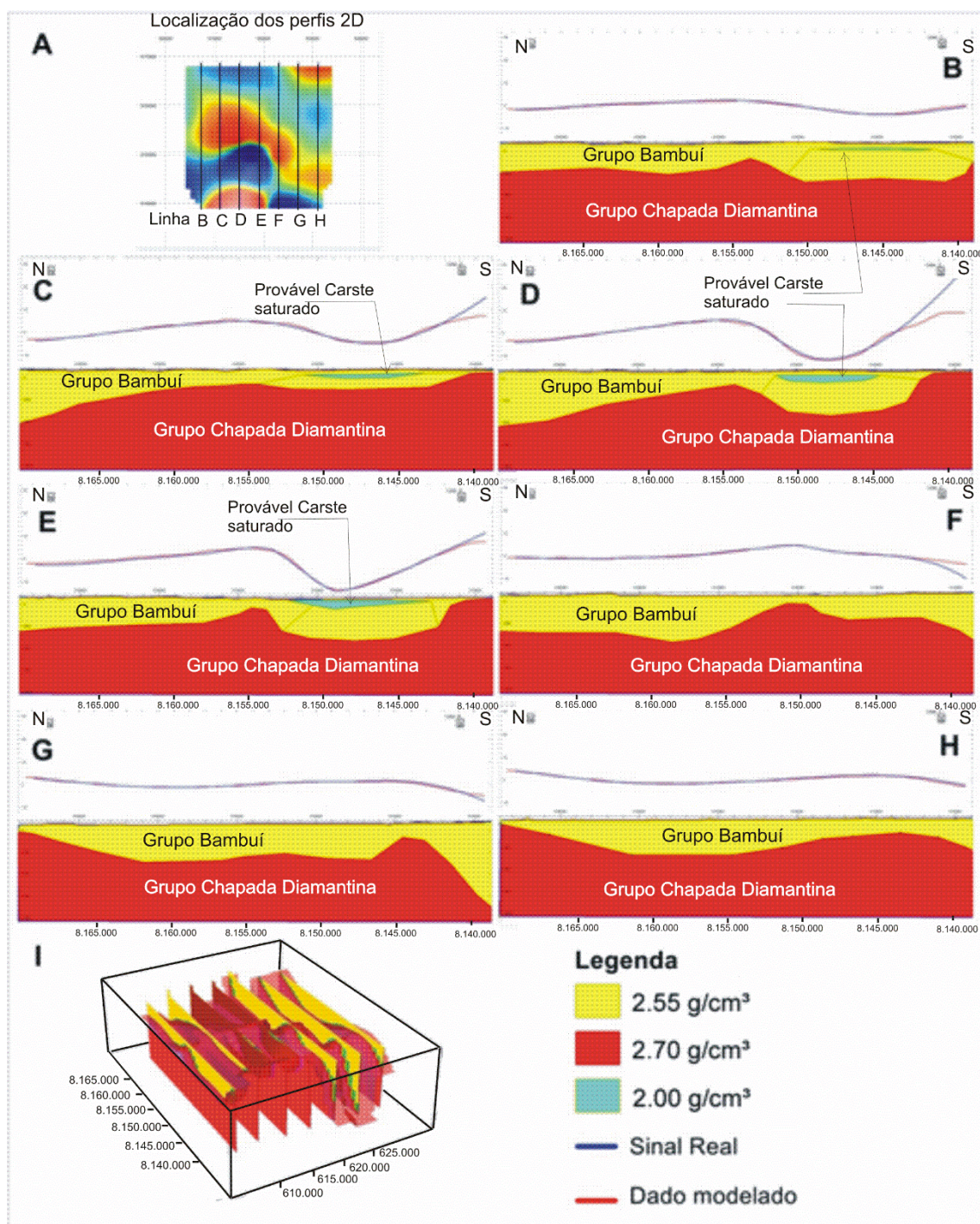


Figura 5.7: Modelagens 2D e 3D da região de Montes Claros.

(A) Localização dos perfis modelados; Seções N-S dos modelos nas coordenadas (B) 607024 m E, (C) 610943 m E, (D) 615147 m E, (E) 619114 m E, (F) 623271 m E, (G) 627285 m E, (H) 631346 m E; E (I) comparação dos perfis modelados 2D com a modelagem 3D.

Os mapas de anomalia *Bouguer* (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5) acusam uma pronunciada anomalia negativa cerca de 5km a sudoeste da cidade de Montes Claros. Os mapas dos gradientes gravimétricos dessa anomalia tornaram-na mais evidente que os mapas *Bouguer*. O mapa de gradiente horizontal E-W (Figura 5.6 A), mostra um forte gradiente lateral de valores Bouguer. Como a anomalia se situa na zona de transição Formação Jacaré Superior/Formação Jacaré Inferior, ela pode estar associada a materiais desagregados preenchendo espaços ao longo de um contato de falha. Essa interpretação deve, entretanto, ser encarada com reservas pelo fato de a anomalia ter sido condicionada por apenas uma estação de medição (estação MC-09).

Do ponto de vista estratigráfico, o que se sabe como certo é a ocorrência em superfície da Formação Lagoa do Jacaré repousando sobre rochas predominantemente pelíticas da Formação Serra de Santa Helena (Chaves *et al.*, 2011).

Os mapas de anomalia Bouguer, acima discutidos, rastreiam as variações de espessura do conjunto de formações do Grupo Bambuí. A Figura 5.9 é explícita ao indicar cotas do substrato do Grupo Bambuí variando entre cerca de -1000 m e -5000 m (espessuras do Bambuí entre cerca de 1.600 m e 5.600 m).

É importante destacar que essas espessuras do Grupo Bambuí não são, naturalmente, espessuras saturadas do aquífero. Essas últimas não ultrapassam 120 metros, conforme discutido no item 6 adiante.

No que diz respeito ao embasamento do Grupo Bambuí, as informações disponíveis são as vastas extensões de afloramento de rochas meta-sedimentares do Grupo Chapada Diamantina na região de Montes Claros (Figura 5.8), de acordo com CPRM/COMIG (2003). Essas rochas constituem, em profundidade, o embasamento do Grupo Bambuí, discernido nos mapas Bouguer (figuras 5.3, 5.4 e 5.5) graças ao seu contraste de densidade com as rochas carbonatadas deste grupo.

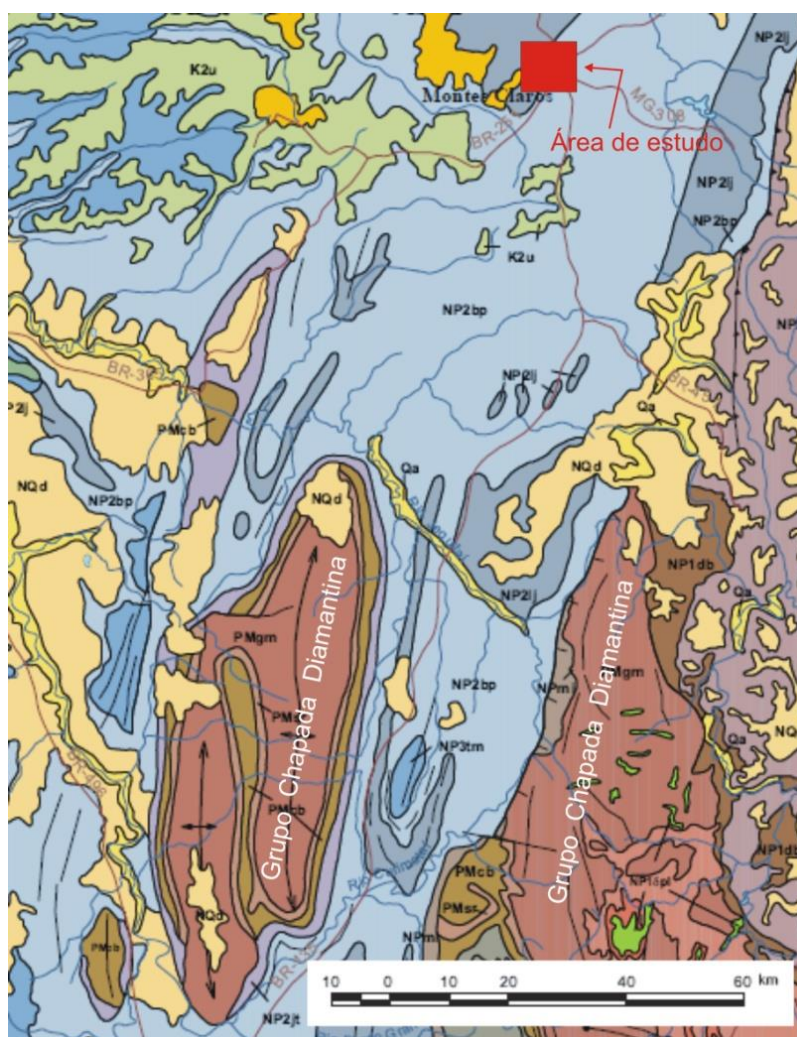


Figura 5.8: Grupo Chapada Diamantina - possível substrato do Grupo Bambuí em Montes Claros.

5.1.3 Mapa do topo do embasamento gravimétrico

Modelos 2D e 3D são mostrados na Figura 5.7. As posições das estações gravimétricas que respaldaram a elaboração desses modelos são mostradas na Figura 5.1. A partir desses modelos e dos resultados dos cálculos de profundidade pela equação de Euler, foi possível obter um mapa da variação da superfície de contraste gravimétrico em profundidade (Figura 5.9). Esta superfície, no presente estágio de conhecimento do problema, está sendo interpretada como o substrato do Grupo Bambuí, representado pelo topo do Grupo Chapada Diamantina.

Considerando que o mapa de variação da superfície de contraste gravimétrico foi obtido a partir do ajuste 3D de polígonos gerados a partir dos perfis 2D modelados, o mesmo apresenta uma clara correlação com o formato regular das formas geométricas modeladas.

A superfície de contraste gravimétrico (provável topo do Grupo Chapada Diamantina) apresenta-se severamente movimentada com cotas variando, grosseiramente, de cerca de -1000 m a cerca de -5000 m (Figura 5.9). Essa variação de cotas, traduzida em termos de profundidades, significa,

aproximadamente, uma variação de 1600 m a algo em torno de 5600 m. Esta severa movimentação do topo do Grupo Chapada Diamantina é sugestiva de falhamentos. Neste sentido, chama a atenção, na Figura 5.9, o nítido alinhamento NW-SE de pequenas espessuras do Bambuí que bordeja, pelo lado sudeste, um nítido alinhamento NW-SE de grandes espessuras.

As espessuras mínimas da ordem de 1.600 m aqui fornecidas pela gravimetria ficam compatíveis com aquelas sugeridas por Iglesias & Uhlein (2009) na região. Esses autores, em seu excelente “*Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozoicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais*”, propõem, com efeito, espessuras da ordem de 1.000 metros para o Grupo Bambuí, a partir da avaliação individual das diferentes formações que o compõem. Esta ordem de grandeza, aliás, é compatível com as prováveis espessuras do Grupo Una na região de Irecê, sugeridas por poços profundos.

5.2 Eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade, por sua vez, tem uma vasta aplicabilidade na pesquisa de água subterrânea. Este método não permite, naturalmente, obter diretamente as resistividades verdadeiras das diferentes rochas presentes no volume de terreno envolvido na medição. Obtêm-se, antes, as resistividades aparentes cujos valores dependem dos valores das resistividades verdadeiras das rochas presentes. Para a obtenção da resistividade aparente, mede-se a diferença de potencial elétrico ΔV , criada entre os eletrodos internos M e N do quadripolo quando se faz circular no solo, através dos eletrodos externos A e B, uma corrente elétrica contínua de intensidade i conhecida. A resistividade aparente para um dado arranjo do quadripolo AMNB é obtida a partir da expressão abaixo:

$$\rho_a = K \cdot \Delta V / i$$

onde:

- ρ_a = Resistividade aparente em ohm.m
- K = Constante cuja dimensão é m (metro) dependente do arranjo geométrico AMNB
- ΔV = Diferença de potencial elétrico, em mV, medida entre os eletrodos internos M e N do quadripolo.
- i = Intensidade da corrente elétrica contínua, medida em mA, que circula no solo através dos eletrodos externos A e B.

Os serviços de eletrorresistividade realizados na área piloto da bacia hidrográfica do rio do Vieira constaram de sondagens elétricas e caminhamentos elétricos.

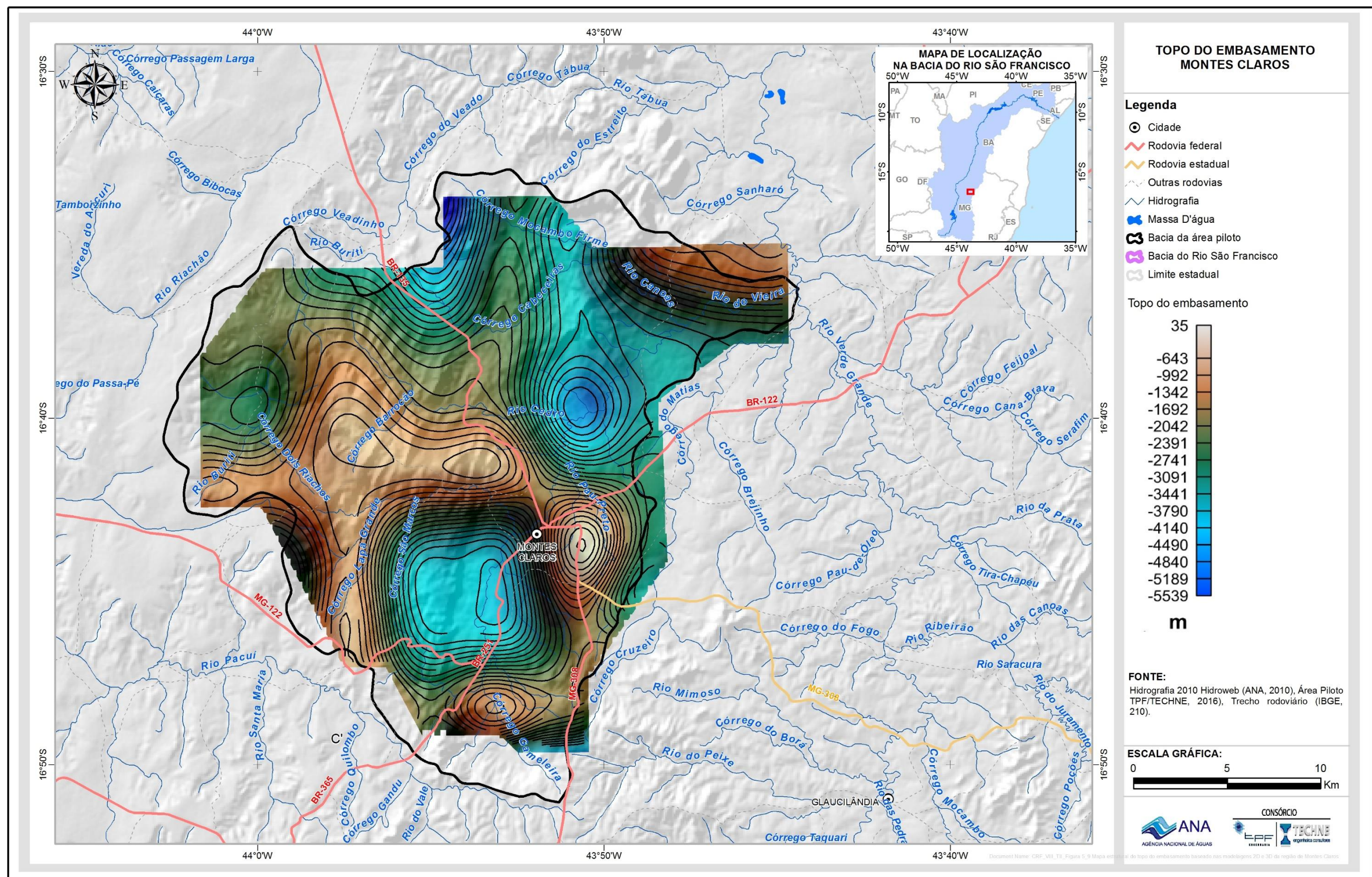


Figura 5.9: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da região de Montes Claros. O desvio para as profundidades é de ± 100 m.

5.2.1 Sondagens elétricas

Realizou-se 54 sondagens elétricas verticais na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, no período de 02 de setembro a 20 de outubro de 2014. Utilizou-se, como dispositivo de medição, o quadripolo linear simétrico de Schlumberger. O comprimento de linha AB de emissão de corrente variou entre 2000 e 4000 m. A distribuição das SEVs é mostrada na Figura 5.10 e na Tabela 5.2 é mostrada a relação dessas SEVs. O conjunto das SEVs em si é mostrado no **ANEXO 2.1**.

Nesse conjunto, a curva mais irregular, composta por uma sequência de pontos, é a curva de campo. A curva mais suave, na cor vermelha, é a curva teórica ajustada à curva de campo através de um método de inversão³. A curva em azul, composta de segmentos retilíneos verticais e horizontais, representa as espessuras e resistividades verdadeiras das camadas elétricas introduzidas pelo processo de inversão. Essas camadas e suas respectivas resistividades verdadeiras constituem o que se chama de modelo geoeletrico, o qual é mostrado, em termos numéricos, na tabela apresentada no lado direito das curvas.

5.2.1.1 Análise das SEVs

Foi realizada uma análise comparativa das SEVs com o objetivo de correlacionar lateralmente entre si os diferentes horizontes elétricos detectados, visualizar seus comportamentos, e estabelecer uma estratigrafia elétrica geral da área em estudo. Esta análise procura, ao final, correlacionar a estratigrafia elétrica estabelecida à sequência litológica da área. Dificultou essa tarefa o fato de que as linhas AB utilizadas foram, muitas vezes, insuficientes devido a dificuldades inerentes à urbanização da área.

A análise realizada permitiu estabelecer, regionalmente, um modelo geoeletrico de quatro horizontes que varia entre os tipos KH (C-R-C-R) e QH (R-C-C-R), segundo Orellana (1972). Os horizontes elétricos detectados são os seguintes:

Horizonte Elétrico 1 - Esse horizonte constitui geralmente um recobrimento pouco espesso, condicionado pela presença ou ausência de solo e/ou alteração das rochas aflorantes. No domínio de predominância de metapelitos (Formação Lagoa do Jacaré Inferior) a resistividade verdadeira do recobrimento varia geralmente de 4 a 3700 ohm.m com quatro valores excepcionais compreendidos entre 6000 ohm.m e 11000 ohm.m. No domínio de predominância de calcários escuros (Formação Lagoa do Jacaré Superior) a resistividade verdadeira do recobrimento varia geralmente de 4000 a 69000 ohm.m com 4 valores excepcionalmente baixos compreendidos entre 25 ohm.m e 1300 ohm.m. A espessura do horizonte 1 é geralmente da ordem de alguns metros, podendo atingir valores máximos da ordem de 20 metros.

³ Foi utilizado o programa de inversão IPI2Win v2.1 (Universidade de Moscou, 2001)

Tabela 5.2 – Relação das SEVs na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

SEV	ZONA	Longitude UTM	Latitude UTM
SEV-67	23K	622366.71mE	8140182.80mS
SEV-68	23K	622594.47mE	8140998.71mS
SEV-69	23K	622832.91mE	8142801.06mS
SEV-70	23K	623140.09mE	8143672.09mS
SEV-71	23K	624554.89mE	8147186.56mS
SEV-72	23K	618261.16mE	8144086.62mS
SEV-73	23K	617618.19mE	8143024.39mS
SEV-74	23K	617156.84mE	8142252.57mS
SEV-75	23K	615519.78mE	8140299.45mS
SEV-76	23K	611513.64mE	8138448.79mS
SEV-77	23K	617060.04mE	8143998.22mS
SEV-78	23K	618572.40mE	8144592.27mS
SEV-79	23K	618953.22mE	8145532.47mS
SEV-80	23K	617087.22mE	8147451.59mS
SEV-81	23K	618564.65mE	8149627.05mS
SEV-82	23K	618864.82mE	8149287.57mS
SEV-83	23K	617042.14mE	8151395.43mS
SEV-84	23K	616068.73mE	8149342.94mS
SEV-85	23K	618120.59mE	8153353.19mS
SEV-86	23K	617059.55mE	8153340.32mS
SEV-87	23K	616352.49mE	8156143.19mS
SEV-88	23K	625454.85mE	8148349.99mS
SEV-89	23K	626534.41mE	8149821.16mS
SEV-90	23K	626916.08mE	8150369.11mS
SEV-91	23K	627590.27mE	8153070.78mS
SEV-92	23K	627994.71mE	8154008.91mS
SEV-93	23K	617317.85mE	8157525.13mS
SEV-94	23K	618894.81mE	8154393.09mS

Tabela 5.2 – Relação das SEVs na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira – Continuação.

SEV	ZONA	Longitude UTM	Latitude UTM
SEV-95	23K	619875.78mE	8155210.04mS
SEV-96	23K	618709.20mE	8156076.08mS
SEV-97	23K	627373.50mE	8156047.83mS
SEV-98	23K	628239.76mE	8154982.27mS
SEV-99	23K	628588.94mE	8156382.42mS
SEV-100	23K	629155.17mE	8156775.36mS
SEV-101	23K	630537.97mE	8157287.33mS
SEV-102	23K	632559.87mE	8157501.64mS
SEV-103	23K	626476.53mE	8158724.01mS
SEV-104	23K	623557.18mE	8156729.89mS
SEV-105	23K	624954.42mE	8158114.32mS
SEV-106	23K	625925.39mE	8159418.83mS
SEV-107	23K	626504.65mE	8160585.42mS
SEV-108	23K	629014.12mE	8161879.90mS
SEV-109	23K	628391.43mE	8161298.75mS
SEV-110	23K	630015.65mE	8162157.64mS
SEV-111	23K	631014.11mE	8162280.54mS
SEV-112	23K	632186.96mE	8162434.12mS
SEV-113	23K	635015.45mE	8164798.97mS
SEV-114	23K	617860.28mE	8158896.83mS
SEV-115	23K	614506.60mE	8158227.72mS
SEV-116	23K	614755.46mE	8161816.23mS
SEV-117	23K	614080.00mE	8160702.00mS
SEV-118	23K	611864.23mE	8162010.88mS
SEV-119	23K	610256.67mE	8163317.09mS
SEV-120	23K	635572.10mE	8157903.79mS

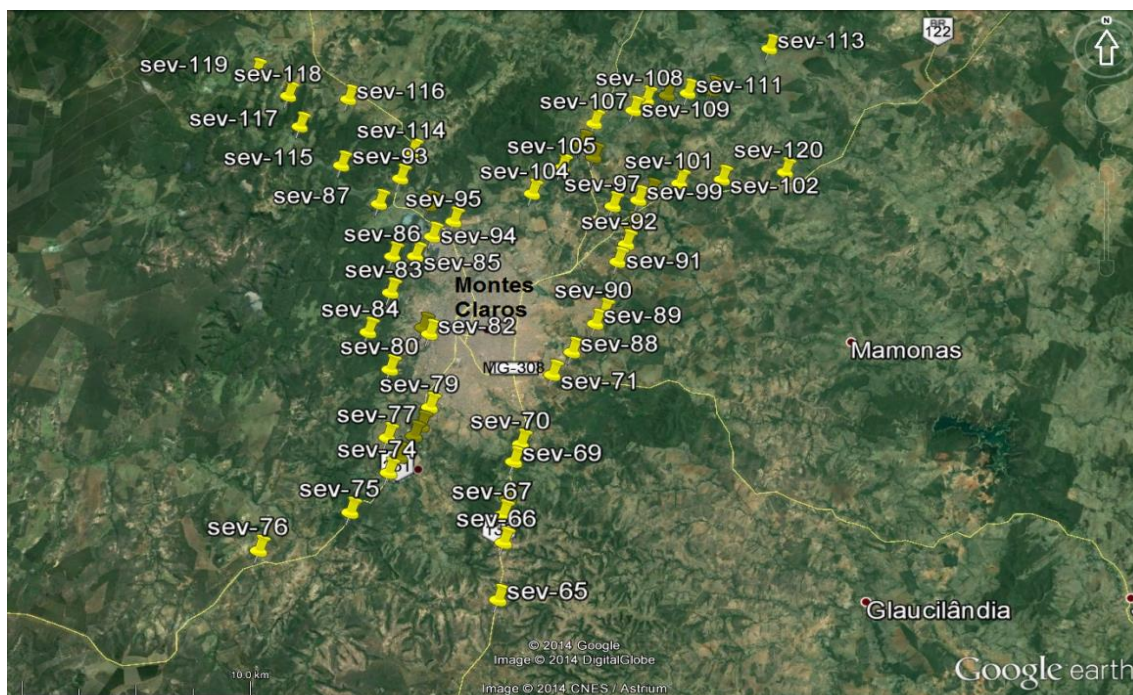


Figura 5.10: Distribuição das SEVs na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

A grande variabilidade da resistividade verdadeira do recobrimento está associada à variabilidade dos solos e à presença de fraturamentos. Esses últimos, em rochas metassedimentares como é o caso, desempenham forte papel no condicionamento da espessura e da natureza do recobrimento e, consequentemente, da sua resistividade. Quando muito condutivo, o horizonte 1 pode ser atribuído ao recobrimento areno-argiloso resultante da alteração da rocha. Quando muito resistivo, esse horizonte corresponde à rocha sã ou um tanto alterada – calcário ou metassiltitos – aflorante ou subaflorante. A presença do freático parece não condicionar a diferenciação elétrica. Essa, aparentemente, é devida predominantemente à litologia.

Horizonte Elétrico 2 - O horizonte 2 é um pronunciado horizonte eletricamente resistivo que se manifesta em forma de sino quando recoberto pelo horizonte 1 quando condutivo. O horizonte 2 corresponde, estratigraficamente, ao horizonte 1, calcário ou metassiltito aflorante ou subaflorante, quando inexiste o horizonte condutivo 1. Em profundidade, este horizonte corresponde a um pacote essencialmente calcário, conforme informações dos poços Siagas consultados. Suas espessuras variam grosseiramente entre 10 e 100 m. Assim, a grande maioria dos poços cadastrados captam fraturas e/ou dissoluções cársticas neste horizonte onde as entradas de água registradas ocorrem predominantemente entre os 15 e os 70 m.

Horizonte Elétrico 3 - O horizonte 3 é um horizonte condutivo que ocorre na base do horizonte 2 na maior parte das SEVs. Ele se manifesta pela presença de um ramo terminal descendente, o qual, embora muitas vezes mal esboçado, permite geralmente uma estimativa confiável da resistência transversal do horizonte 2. Este horizonte 3 apresenta às vezes grande magnitude elétrica constituindo, em muitos casos, o substrato elétrico do horizonte resistivo 2. Em alguns poucos casos, entretanto, delineia-se um horizonte resistivo na base do horizonte 3, o que permite caracterizar eletricamente este último. As

informações disponíveis sugerem que as pequenas condutâncias longitudinais do horizonte 3 parecem estar associadas ao recobrimento areno-argiloso da rocha sã. Por outro lado, as grandes condutâncias longitudinais, mais profundas, parecem ser devidas a significativas intercalações de metapelitos no seio dos calcários como, por exemplo, 28 metros no poço Siagas 3100016977.

Horizonte Elétrico 4 - Esse horizonte constitui um substrato resistivo que se manifesta raramente nas SEVs. Desde que os metapelitos (filitos e ardósias) aparentam ser mais condutivos que os calcários, este horizonte 4 pode ser um espesso banco calcário. A base desse banco calcário é desconhecida, mas é lícito imaginá-la como o topo da Formação Serra de Santa Helena em profundidade não alcançada pela eletrorresistividade.

5.2.1.2 Interpretação geológica das SEVs

As profundidades investigadas pelas SEVs não ultrapassaram os limites da Formação Lagoa do Jacaré, pelos motivos seguintes:

- A urbanização da área estudada que impediu a utilização de comprimentos de linha AB maiores que 2000 m;
- A presença frequente de recobrimentos eletricamente condutivos (solos argilosos), o que diminui significativamente a profundidade de investigação.

Por outro lado, a grande variação lateral das resistividades verdadeiras, em todos os horizontes elétricos detectados, não recomenda tentativas de quantificação. Apesar dos 37 poços cadastrados com perfil litológico, não foi possível a realização de sondagens elétricas de aferimento. Os poços, com efeito, se encontram em situações inviáveis, do ponto de vista de urbanização, e/ou os perfis não mostram diferenciações litológicas que pudessem ser confrontadas com diferenciações elétricas nas SEVs. Esta última dificuldade, em particular, impede a avaliação de resistividades verdadeiras que é condição imprescindível à quantificação.

Em face do acima exposto, partiu-se para uma interpretação qualitativa que pudesse fornecer informações que, embora simples, fossem úteis e confiáveis. Como base para esta interpretação buscou-se apoio nos dados dos 37 poços cadastrados acima citados. Chama a atenção o fato de que as profundidades desses poços chegam, em alguns casos, até 150 m. Os mesmos são, entretanto, revestidos até, no máximo, 40 m, na dependência da espessura do recobrimento inconsolidado. O material aquífero em si é, portanto, compacto, não demandando revestimento nem filtros. As observações em afloramentos e os resultados dos testes de aquífero indicam que este material apresenta permeabilidade e porosidade de fraturas. Os perfis dos poços confirmam este comportamento, exibindo entradas de água isoladas predominantemente entre os 15 e os 70 metros.

A zona de incidência das entradas de água situa-se no âmbito do horizonte elétrico 2, resistivo, acima descrito, constituído predominantemente de calcários. Sabe-se, de experiências anteriores, que calcários ricos em carbonato de cálcio são mais propensos à dissolução e pouco se alteram, de

modo que deixam poucos resíduos formadores de solo. Esses são os calcários onde se desenvolvem preferencialmente as feições cársticas, sendo, assim, os calcários aquíferos por excelência. Eles são também eletricamente mais resistivos, o que lhes é uma característica distintiva.

Verifica-se assim, do acima exposto, que a zona aquífera mais importante na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira corresponde eletricamente ao horizonte 2 acima definido, quer se trate da porção inferior ou da porção superior da Formação Lagoa do Jacaré. O comportamento dessa zona aquífera enquanto horizonte resistivo pode ser visualizado qualitativamente através do zoneamento do parâmetro elétrico resistência transversal⁴. Resistências transversais altas significam que a zona aquífera é mais espessa e/ou mais carstificada. Resistências transversais baixas significam que a zona aquífera é menos espessa e/ou menos carstificada. Este parâmetro elétrico detém, portanto, um significativo poder de diagnóstico qualitativo das propriedades aquíferas dos calcários.

Outro parâmetro elétrico considerado no presente estudo é a resistividade aparente, tanto nos perfis de resistividade como nas SEVs, medida com AB de 200 m. Os valores obtidos, no presente caso, são também sensíveis à natureza e às espessuras das rochas do horizonte elétrico 2. Esses valores serão tanto mais altos quanto mais carbonática e/ou mais espessa for o horizonte e, vice-versa, serão tanto mais baixos quanto mais pelítica, e/ou menos espessa e/ou menos carbonática for o horizonte.

Não é possível separar, aqui, os efeitos das diferentes variáveis acima citadas no condicionamento dos valores da resistência transversal e da resistividade aparente. Essa limitação, entretanto, não compromete o poder desses parâmetros como diagnóstico qualitativo da potencialidade hidrogeológica dos aquíferos em geral⁵.

5.2.1.3 Zoneamento do parâmetro elétrico resistência transversal

A obtenção de cortes geoelétricos através da inversão dos dados de campo (ver item 5.2.1) foi importante na avaliação dos valores da resistência transversal do horizonte 2. A análise comparativa das curvas de sondagem elétrica (item 5.2.1.1), entretanto, foi vital na confirmação e, em muitos casos, na correção desses valores.

A Figura 5.11 mostra o zoneamento de resistências transversais do horizonte 2. No zoneamento de resistências transversais (Figura 5.11) as seguintes observações são pertinentes:

- Na zona de afloramento de metassiltitos (Formação Lagoa do Jacaré Inferior) as resistências transversais são geralmente inferiores a 8.000.100,00 ohm.m², sugerindo uma menor expressividade aquífera

⁴ Resistência transversal de um horizonte resistivo é o produto da espessura desse horizonte pela sua resistividade verdadeira. Ela pode ser obtida sem ambiguidades a partir das curvas de sondagem elétrica.

⁵ Resistência transversal alta significa mais carbonático e/ou menos argiloso e/ou mais espesso, o que aponta para um maior potencial aquífero. Resistência transversal baixa significa o oposto.

dos calcários. A simples inspeção do zoneamento de vazões (Figura 6.4) já mostra esse comportamento, com uma nítida tendência a valores mais altos nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior;

- O alinhamento de maiores resistências transversais, na Figura 5.11, se apoia numa passagem de altos valores do índice de carstificação flagrada no perfil de resistividades A, e também na distribuição de resistividades aparentes tomadas com AB 200 metros nas SEVs (Figura 5.12).

5.2.1.4 Zoneamento do parâmetro elétrico resistividade aparente

A Figura 5.12 mostra o zoneamento da resistividade aparente em AB de 200 metros. Neste zoneamento das resistividades aparentes foram considerados todos os valores medidos nos perfis de resistividade A e B e nas SEVs. Esse zoneamento não apenas ratifica uma maior potencialidade aquífera ao longo da direção NW, como sugere um extravasamento para sudeste, até as proximidades do aeroporto, dos calcários aquíferos da Formação Lagoa do Jacaré Superior. Este comportamento elétrico leva a repensar as relações entre os calcários superiores (Formação Lagoa do Jacaré Superior) e os metassiltitos inferiores (Formação Lagoa do Jacaré Inferior). Além disso, fica reforçada a hipótese que propõe o papel dos fraturamentos NW-SE como direções preferenciais de carstificação. Essas direções preferenciais, detectadas a pequena profundidade pela eletrorresistividade, podem ser reflexos da estruturação profunda do substrato, conforme sugerido pela gravimetria no item 5.1.4.1.

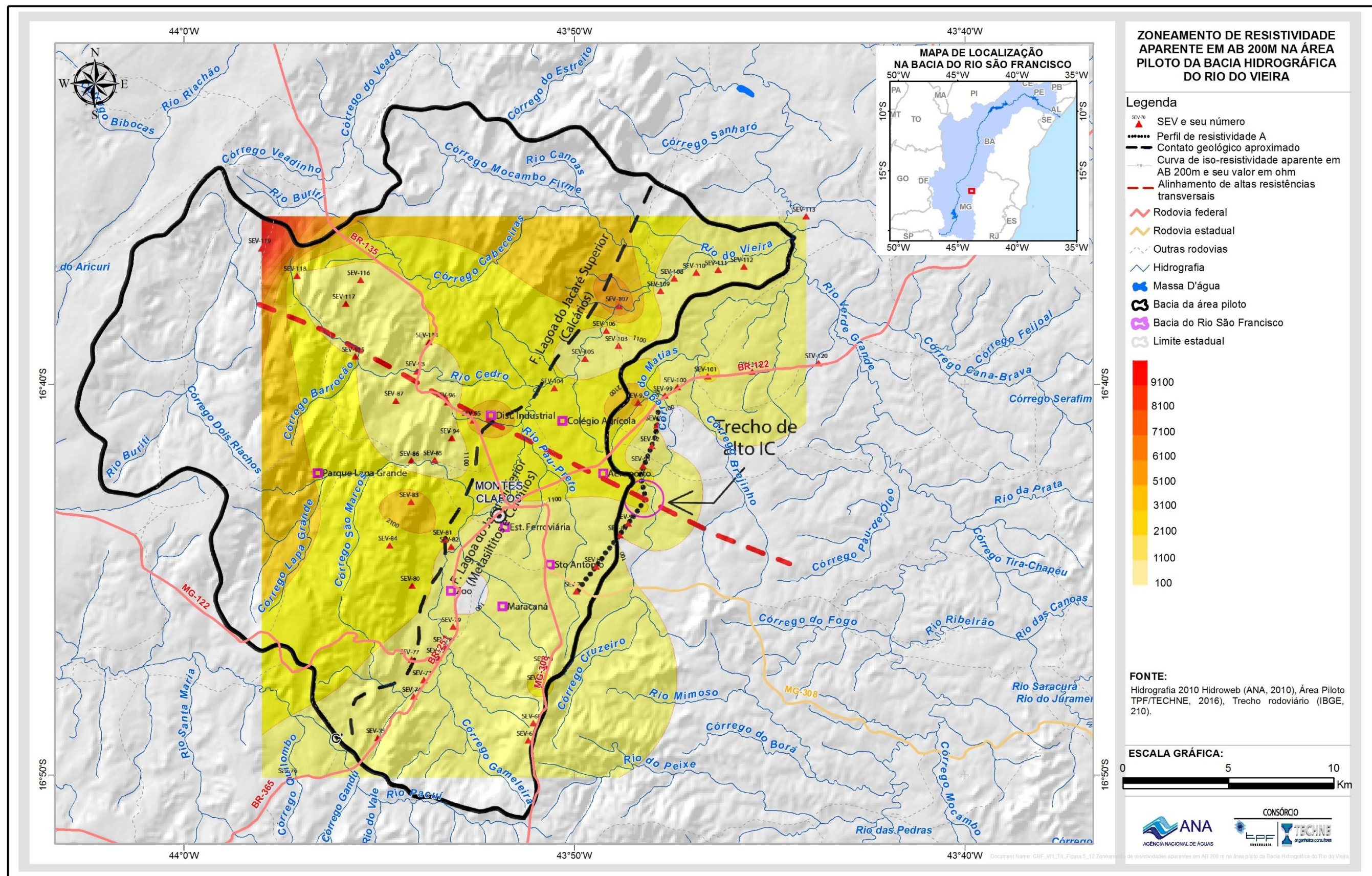


Figura 5.12: Zoneamento de resistividades aparentes em AB 200 m na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

5.2.2 Caminhamentos elétricos

Foram realizados dois caminhamentos elétricos na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira no período de 18 de junho de 2014 a 18 de julho de 2014. A localização dos caminhamentos está apresentada na Figura 5.13, na Figuras 5.14 são mostrados os Perfis A e B.

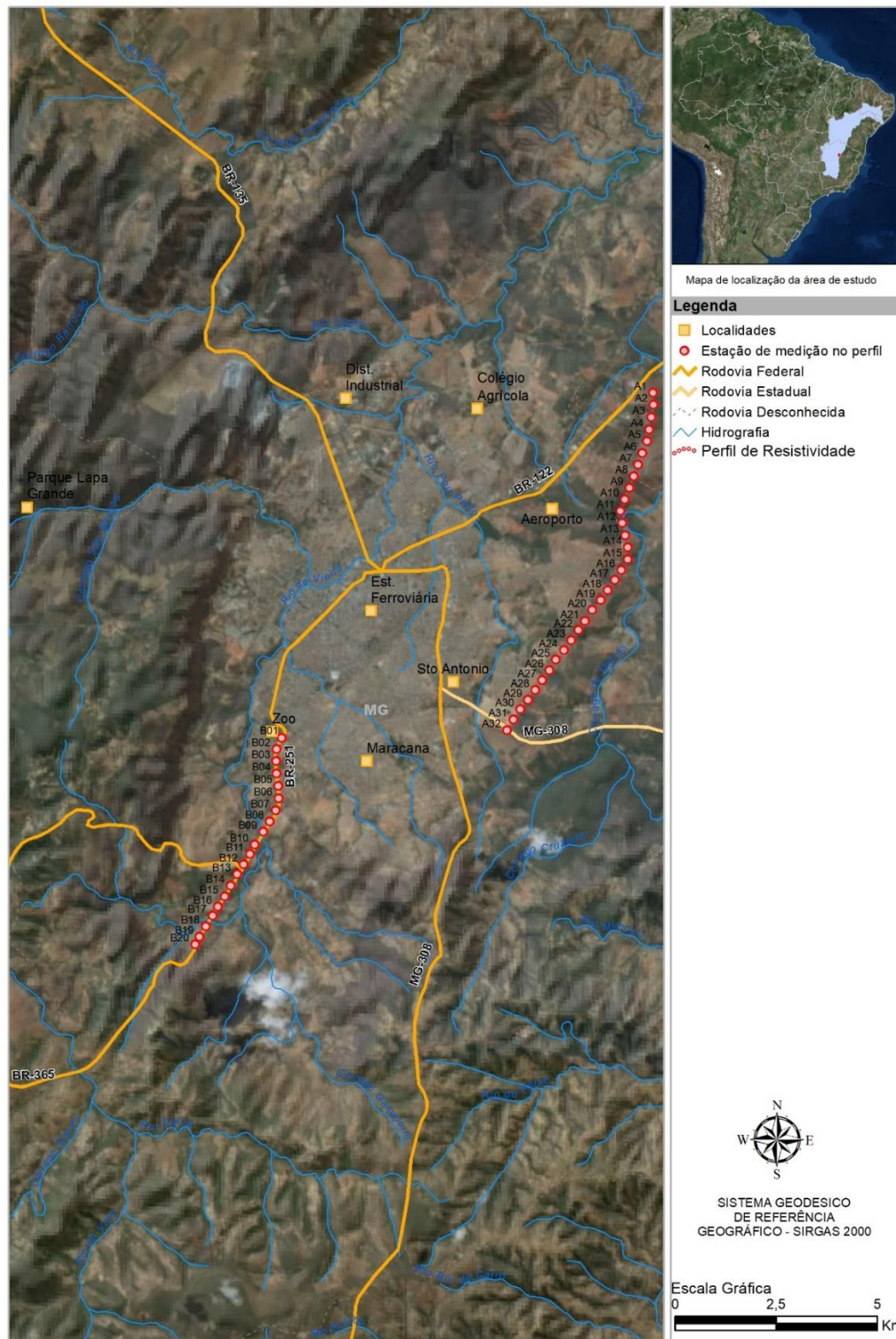


Figura 5.13: Caminhamentos elétricos em Montes Claros.

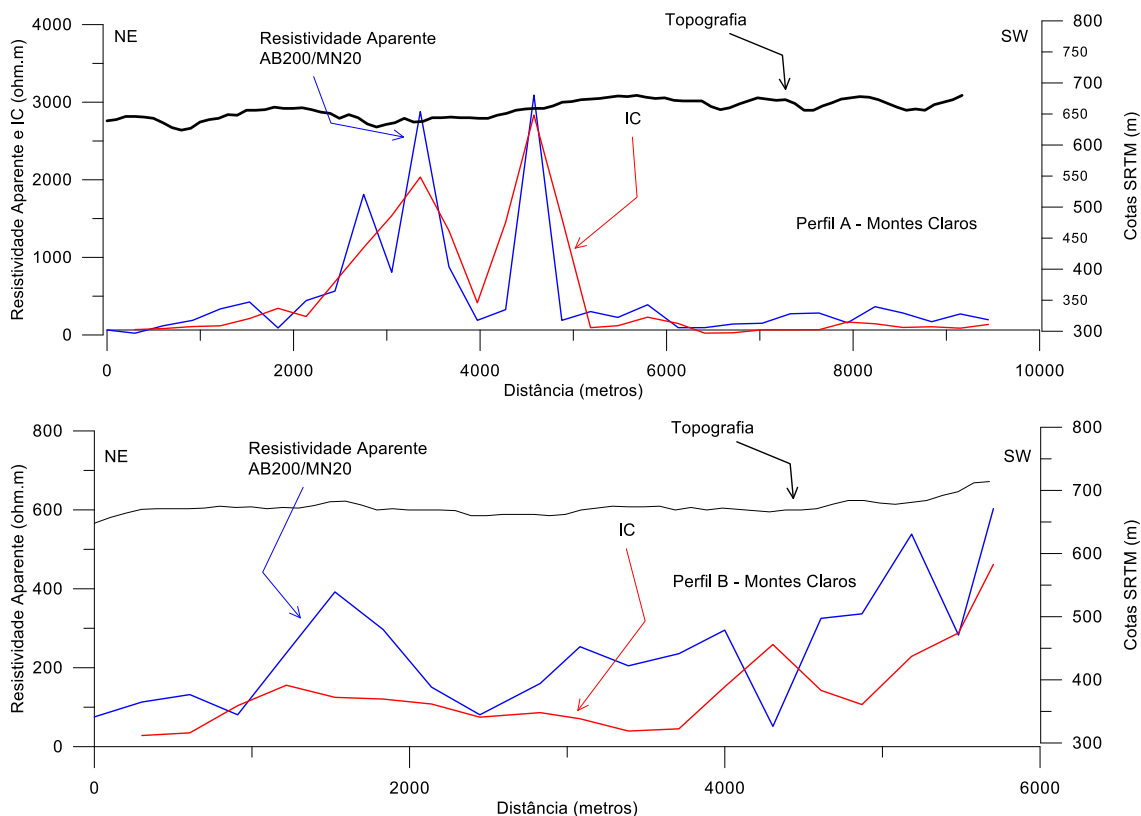


Figura 5.14: Perfil de resistividades A e B em Montes Claros.

No perfil A observa-se uma passagem resistiva e com altos valores do índice de carstificação, entre as estações de números 8 e 18. Esse trecho do perfil passa imediatamente a leste da cabeceira leste da pista de pouso do aeroporto de Montes Claros. Examinando-se a Figura 6.5 – Zoneamento de Vazões, verifica-se que o Perfil A, no trecho em questão, intercepta um alinhamento de altas vazões orientado aproximadamente NW-SE. A passagem com altos valores do IC, acima citada, coincide com uma concentração de dolinas mostrada no mapa da Figura 4.12. O conjunto das informações acima permite consolidar a hipótese, levantada na Figura 6.5, segundo a qual o alinhamento NW-SE de manchas de alta vazão pode corresponder a uma direção de fraturamento da Formação Lagoa do Jacaré, ao longo da qual teriam preferencialmente ocorrido carstificações mais intensas.

No perfil B não se observam anomalias significativas do índice de carstificação. Apenas na extremidade sul do perfil ocorrem valores um pouco mais altos, mas nada que seja comparável à grande anomalia constatada no perfil A.

5.2.3 Comentários finais

Pela sua própria natureza e considerando os objetivos do estudo, o alvo da gravimetria foi a estruturação profunda da área, com ênfase no topo do substrato do Grupo Bambuí. A resistividade, por sua vez, enfocou a zona aquífera do Grupo Bambuí, limitada aos seus primeiros 120 metros.

Assim, se do ponto de vista da geologia mais ampla a gravimetria foi mais importante, a resistividade foi mais efetiva na obtenção de informações práticas e objetivas sobre o comportamento hidrogeológico do chamado Aquífero Bambuí.

5.3 Perfílage m Óptica e Geofísica

A perfílage m óptica, também chamada de filmagem, consiste na investigação dos poços a partir da geração de imagens laterais e de fundo. As imagens em poços não revestidos auxiliam na identificação das formações e suas respectivas estruturas, como pequenas falhas e fraturas que, se preenchidas ou não, guiarão na identificação de intervalos produtores.

A perfílage m geofísica de poços é um método que utiliza fontes para excitar o meio a ser investigado. Seu principal objetivo é a identificação dos melhores trechos litológicos, diâmetros dos poços, características elásticas do meio, que não seriam obtidas apenas a partir da perfuração, amostragem e testes.

Os perfis geofísicos de uso mais frequente na hidrogeologia, classificados com base em suas propriedades físicas, são o elétrico ou indutivo cuja resposta é a resistividade do meio; o acústico para a determinação do tempo de trânsito e da velocidade da onda sonora que são proporcionais à porosidade total da rocha; o radioativo natural para determinação da argilosidade do meio; e o mecânico, também chamado de caliper, para determinar as variações de diâmetro da perfuração.

As ferramentas empregadas no estudo, seus códigos de referência e suas respectivas propriedades são apresentados na tabela 5.3:

Tabela 5.3 Identificação dos métodos geofísicos aplicados.

Perfil de Multifunção (9143) As cores dos diferentes sensores da ferramenta foram padronizadas pela Perfil, ou seja, todos os poços perfilados por essas ferramentas apresentarão sempre as mesmas cores e, dentro do possível, as mesmas escalas.	Gama, Potencial Espontâneo (SP), Resistividade Normal (16" e 64"), Resistividade Lateral, Resistividade de Fluido, Resistividade <i>Single-point</i> , Temperatura, Desvio (Slant Angle) e Azimute (Slant Angle Bearing).
Perfil Sônico (9320)	Gama, VSH, Delta T, BHC-Delt, Time (F), Time (N), Porosidade (Sônica) e Porosidade (Efetiva).
Perfil de Caliper (8074)	Caliper.

A partir dos dados fornecidos pela ferramenta 9143 foram calculadas as curvas correspondentes aos desvios dos poços e, posteriormente, gerados os desvios em planta. A ferramenta 9320 tem sensores que registram os raios gama, as velocidades e os tempos de trânsito, a partir dos quais se obtém a porosidade total. Já as curvas de volume de folhelho (VSH) e de porosidade efetiva (POREFF) foram calculadas e a partir das leituras fornecidas pela ferramenta, permitindo, com isso, uma avaliação das propriedades hídricas da sequência litológica perfilada.

Com a finalidade de avaliar o comportamento pontual em subsuperfície do aquífero cárstico desenvolvido na Formação Lagoa do Jacaré, foram selecionados cinco poços convenientemente espaçados. Esses poços são indicados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Poços utilizados.

Nome SIAGAS	Código do Perfil	Cidade	Perfilagem	
			Ótica	Geofísica
3100012514	PKT_14_MG	Montes Claros	Sim	Sim
3100020692	PKT_15_MG	Montes Claros	Sim	Sim
MC 033P	PKT_16_MG	Montes Claros	Sim	Sim
3100012510	PKT_17_MG	Montes Claros	Sim	Sim
MC 074P	PKT_18_MG	Montes Claros	Sim	Sim

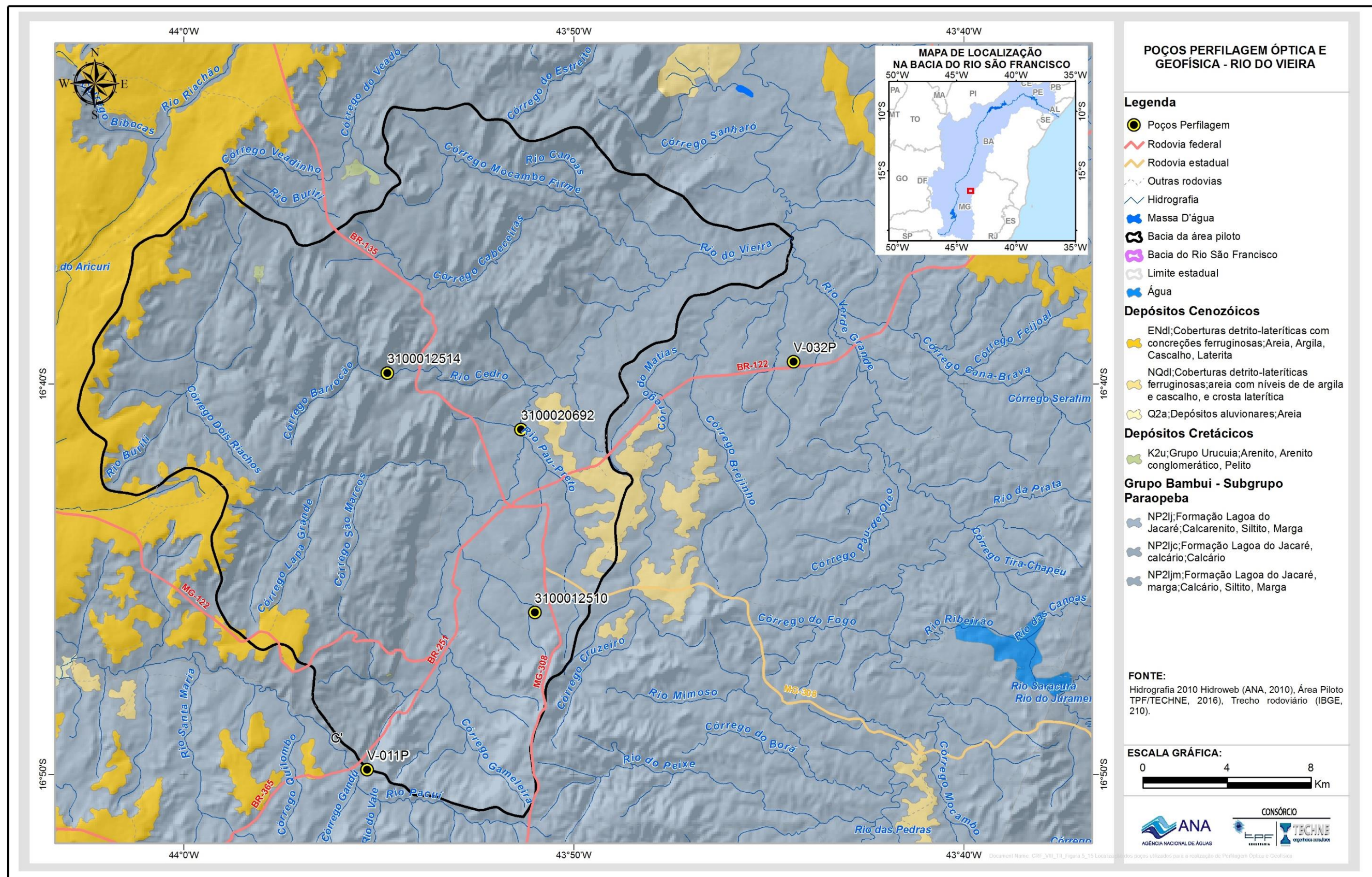


Figura 5.15 Localização dos poços utilizados para a realização de Perfisagem Óptica e Geofísica.

A Formação Lagoa do Jacaré ocorre em cotas mais baixas na porção leste da área, exibindo intercalações de siltito; e ocorre em cotas mais altas, na porção oeste, onde predominam calcários. As perfilagens mostraram que esses calcários apresentam duas fácies distintas e predominantes, e uma terceira fácies subordinada. A primeira fácies corresponde a um calcário cinza médio, homogêneo. A segunda fácies corresponde a um calcário cinza escuro a preto, rico em veios e fraturas preenchidas por calcita. A fácies subordinada corresponde a um calcarenito friável, de fácil reconhecimento pelo fato de deixar a água bastante turva com partículas em suspensão.

Os poços localizados na porção oeste, dos quais o mais representativo é o 3100012514, apresentam, até cerca de 70,0 metros, um calcário cinza claro, homogêneo, com fraturas concordantes com o acamamento e exibindo aberturas de 8 a 10 cm de altura, mas sem profundidade significativa. Ocorrem também micro-fraturas abertas perpendiculares ao acamamento (Figura 5.16). Abaixo dos 70 metros, o calcário apresenta uma coloração cinza escuro, intercalado com margas e cortado por fraturas preenchidas por calcita com uma direção preferencial verticalizada e veios de calcita com direção preferencial horizontalizada concordante ao acamamento (Figura 5.17).

Os poços perfilados na porção leste (Formação Lagoa do Jacaré Inferior) apresentaram um comportamento litológico mais variado e mostraram fraturas muito abertas e produtoras.

No poço 3100012510 o calcário apresenta predominância de duas das três fácies acima citadas. A primeira que vai até cerca de 52,00 metros de profundidade corresponde a um calcarenito cinza, bastante friável, com fraturas abertas. Essa fácies é responsável por deixar a água turva, como acima citado (Figura 5.18). Abaixo dos 52 metros há um predomínio do calcário cinza escuro a preto, rico em fraturas e veios preenchidos por calcita, paralelos ao acamamento e mostrando fraturas verticalizadas, perpendiculares aos veios (Figura 5.18 c e d).

Nos perfis de resistividade observa-se um bandeamento elétrico com camadas de baixa resistividade, no entorno dos 100 ohm.m, alternando com pacotes mais resistivos, de resistividade igual ou maior que 1000 ohm.m.

Os perfis de raios gama, que deveriam mostrar baixos valores nos calcários, apresentam valores aleatórios, sem um padrão definido, provavelmente por conta das intercalações de siltitos.

A ferramenta caliper, de três braços, flagrou pequenos picos em todos os poços, com destaque para os poços V32P e 3100020692 onde a densidade de fraturas abertas profundas é menor conforme discutido anteriormente.

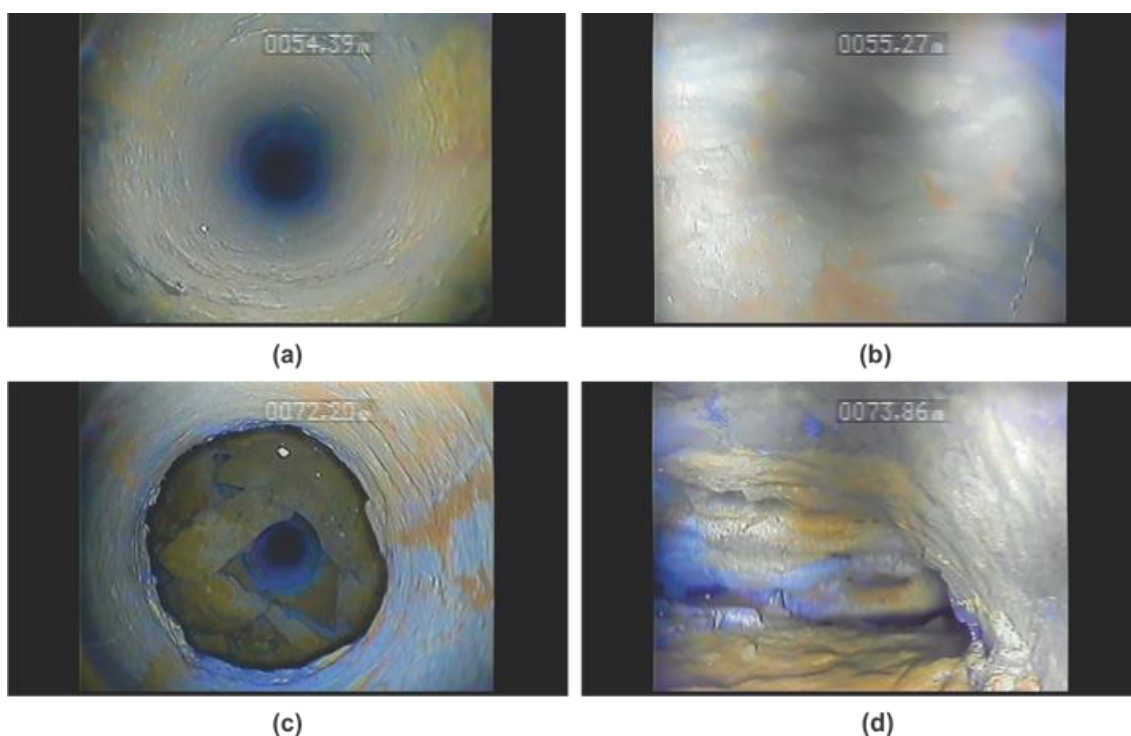


Figura 5.16 Perfilagem óptica no Poço 3100012514. (a) Único poço representativo da Formação Lagoa do Jacaré (Calcário); (b) Comportamento do calcário representando a fácies cinza claro e homogêneo; (c) Fratura aberta concordante ao acamamento; (d) Vista lateral do comportamento das fraturas abertas com padrão comum nos poços perfilados na área de estudo.

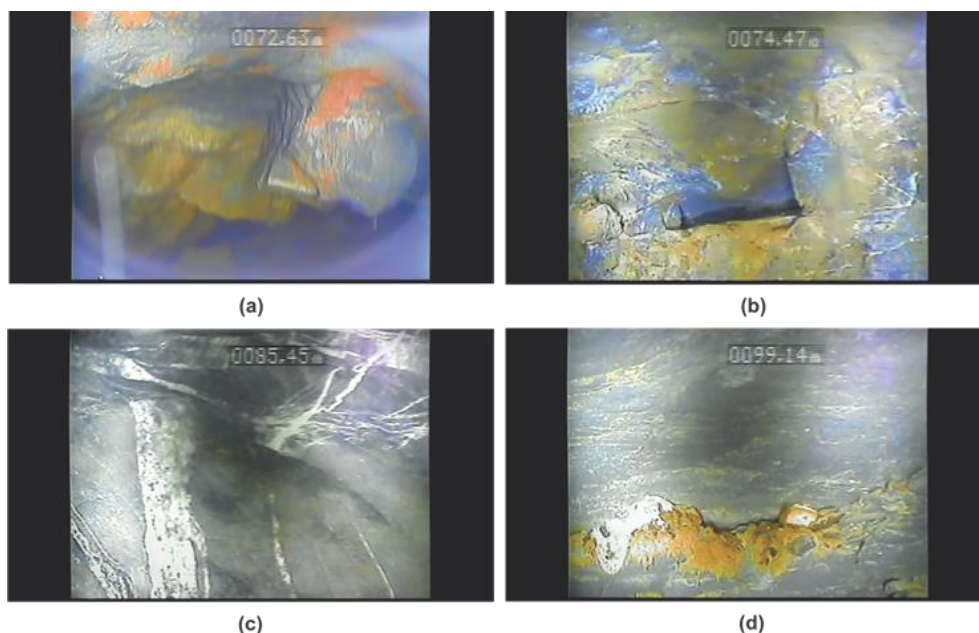


Figura 5.17 Perfilagem óptica no Poço 310012514. (a) Vista interna da fratura aberta concordante ao acamamento; (b) Outro exemplo do comportamento das fraturas abertas presente nesta fácies; (c) Fácies representando um calcário cinza escuro com ocorrência densa de fraturas preenchidas por calcita do calcário da Formação Lagoa do Jacaré (Calcário); (d) Micro-espacos entre os planos de acamamento.

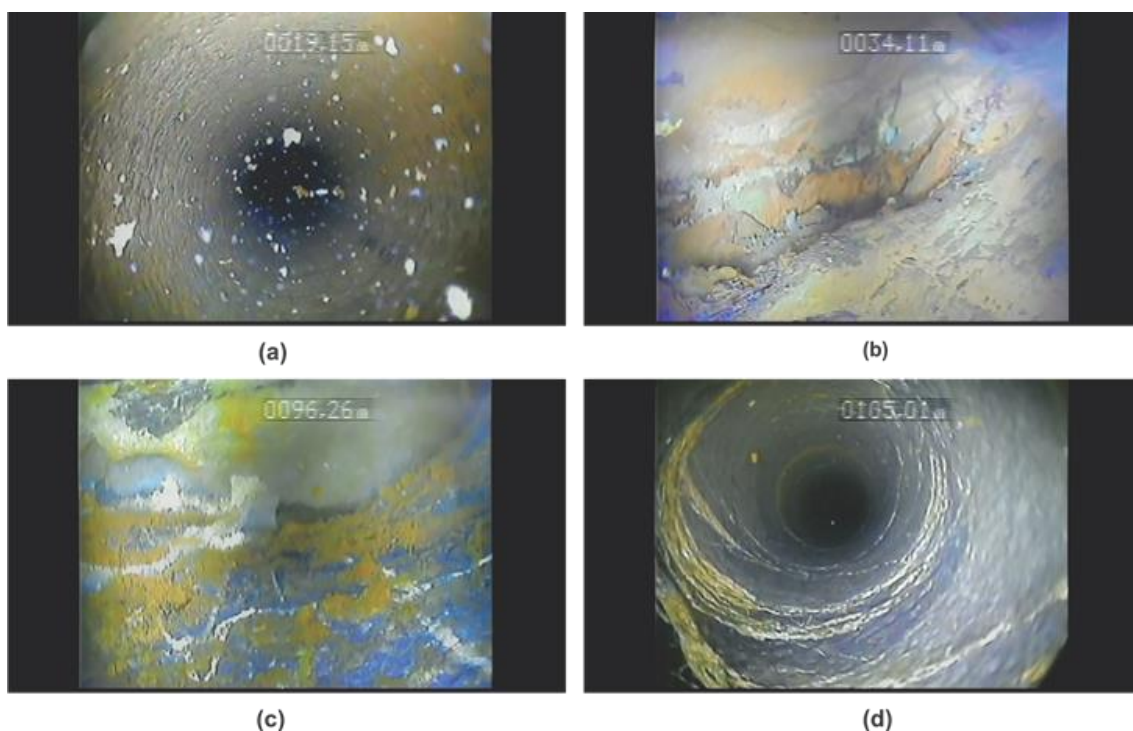


Figura 5.18 Perfilagem óptica no Poço 3100012510. (a) Água turva consequência característica da fácies mais friável observada na Formação Lagoa do Jacaré (Siltito); (b) Comportamento comum das fraturas abertas concordantes ao acamamento; (c) Fratura aberta resultante da interseção com direções distintas com fraturas preenchidas; (d) Vista geral da fácies cinza escuro.

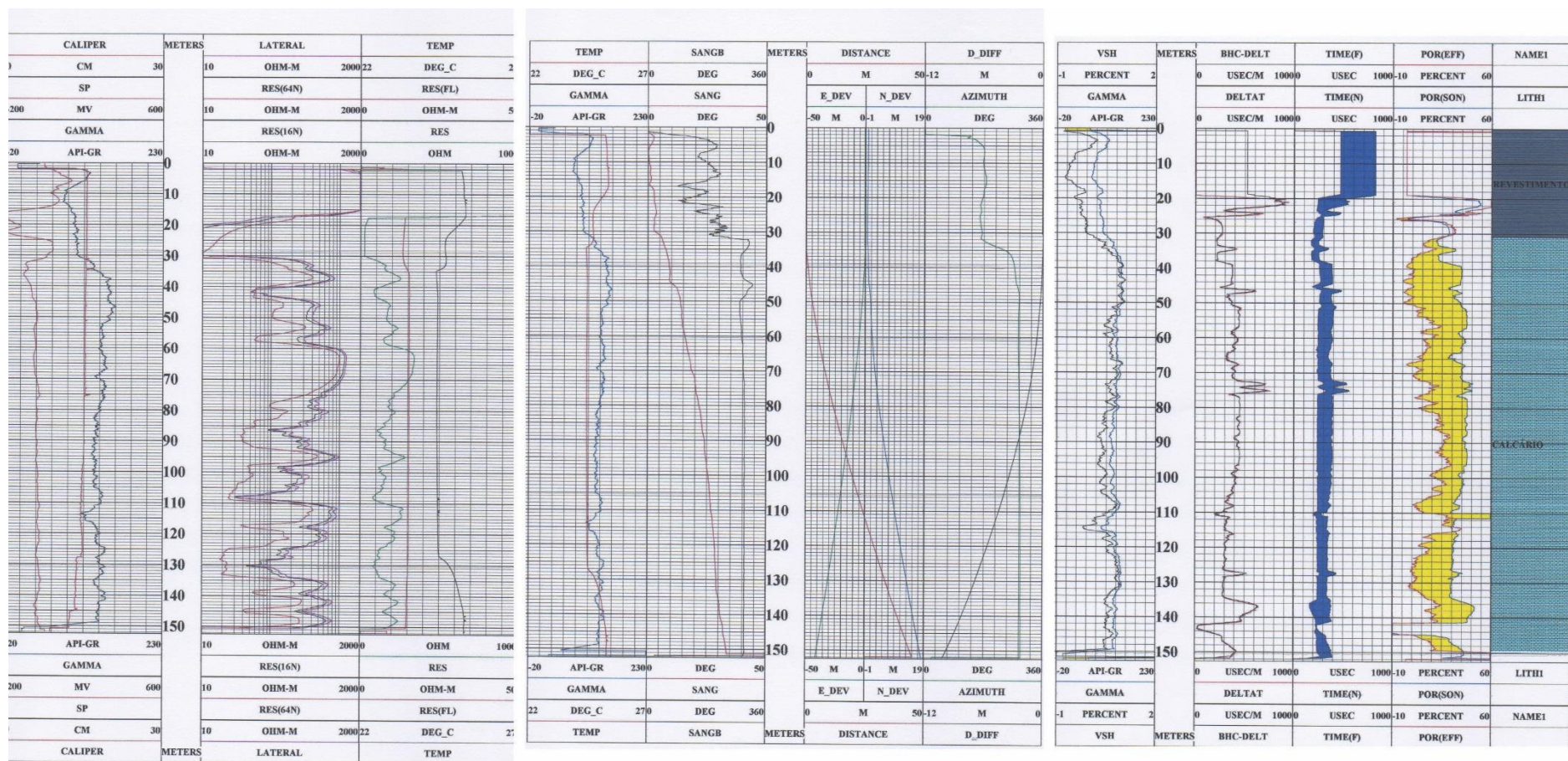


Figura 5.19 Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço 3100020692.

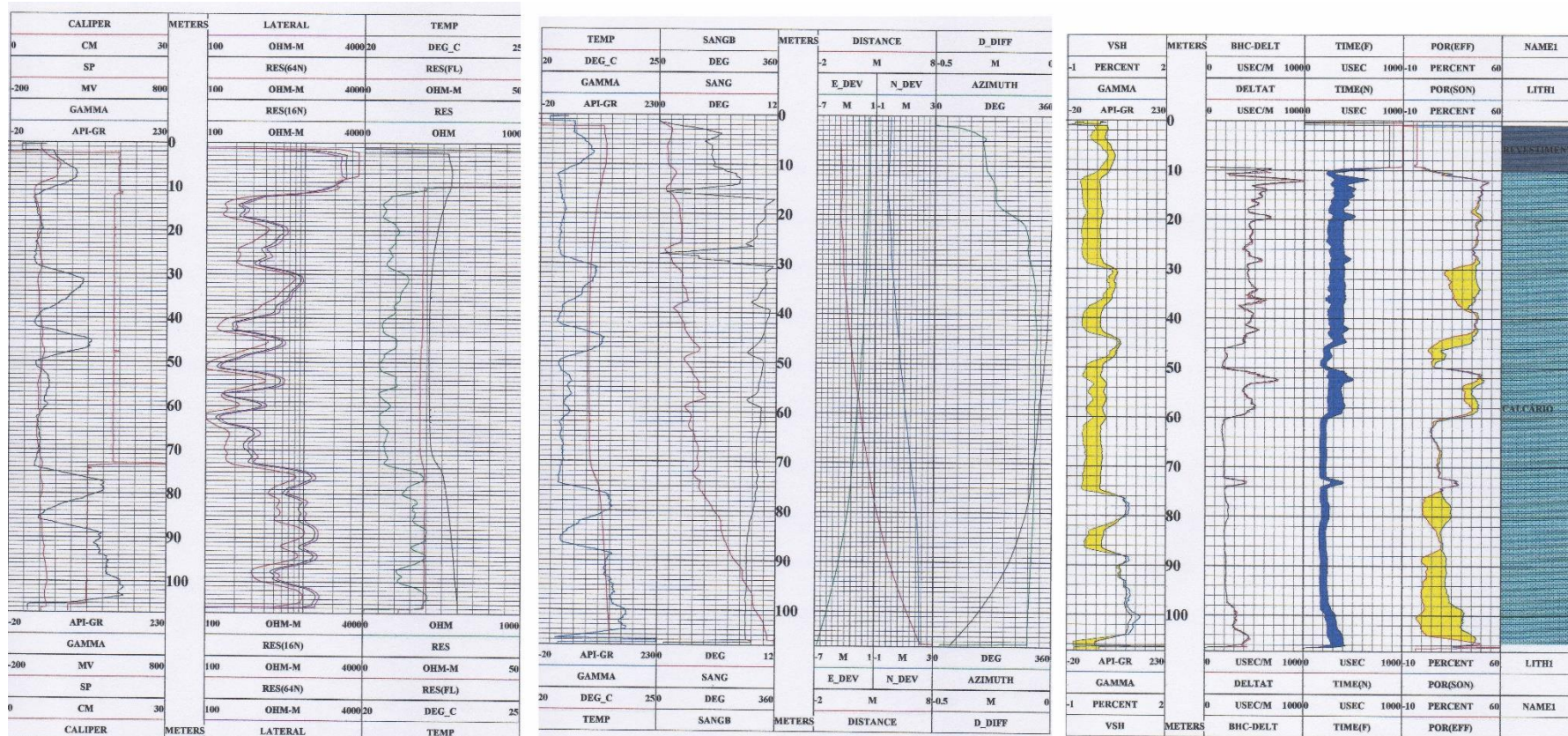


Figura 5.20 Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço 3100012514.

6. HIDROGEOLOGIA

No contexto geral do Carste São Francisco a região de Montes Claros é parte de faixa alongada e estreita que atravessa a porção central de Minas Gerais até o sul da Bahia, englobando as localidades de Sete Lagoas, Curvelo, Montes Claros, Janaúba e Bom Jesus da Lapa. Corresponde ao compartimento estrutural leste da bacia do São Francisco definida por Allkmin & Martins-Neto (2001), onde afloram rochas carbonáticas e pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí.

Predominam, na área de estudo, rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré, por vezes, recobertas discordantemente por relíquias de arenitos do Grupo Urucuia no topo de algumas elevações. Complementando a sequência sedimentar, são comuns amplas áreas recobertas por sedimentos cenozoicos, dentre os quais citam-se coberturas detríticas aluvionares, eluvionares e coluvionares. O universo de poços trabalhados na presente área Piloto foi de 1062, sendo 41 novos poços cadastrados com medição do nível estático ao longo dos trabalhos de campo entre os anos de 2013 e 2015, e registrados 1021 (27 – COPASA, 231 – IGAM E 763 – SIAGAS), dos quais apenas 36 poços com perfil litológico e construtivo. Essas informações foram exploradas em busca de uma melhor compreensão do comportamento hidrogeológico da área.

O rio do Vieira é afluente pela margem esquerda do rio Verde Grande, em seu alto curso, nele desembocando 19 km em linha reta a nordeste do centro de Montes Claros. A área piloto da Bacia do rio do Vieira (Figura 2.1) mede 579 km², incluindo toda a área urbana de Montes Claros.

Ocorre na área piloto apenas a Formação Lagoa do Jacaré, exibindo duas fácies distintas que condicionam duas superfícies altimétricas distintas. Essas fácies e respectivas superfícies altimétricas são as seguintes:

- Superfície de aplainamento na cota média de 650 metros, desenvolvida em siltitos e calcários da porção inferior da Formação Lagoa do Jacaré. A zona urbana de Montes Claros está assentada sobre essa superfície.
- Superfície residual na cota média de 800 metros, desenvolvida em calcários da porção superior da Formação Lagoa do Jacaré, em virtude da sua maior resistência à erosão. Cerca de $\frac{3}{4}$ da área da bacia hidrográfica do rio do Vieira desenvolve-se nesses calcários, em altas cotas, no flanco esquerdo do rio.

Uma análise das vazões, envolvendo a totalidade de poços captando a Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí, na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, resultou no gráfico apresentado na Figura 6.1

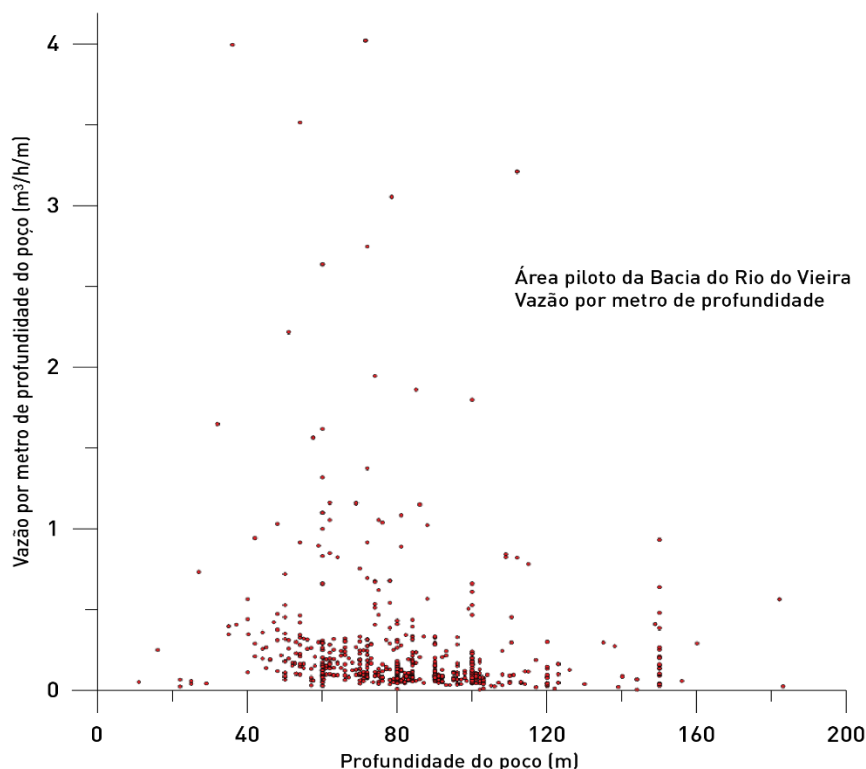


Figura 6.1: Vazão/metro de profundidade x profundidade dos poços captando a Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí.

Não se observa no gráfico acima, uma correlação significativa entre a vazão por metro de profundidade e a profundidade dos poços nos calcários. A distribuição dos pontos, entretanto, permite verificar o seguinte:

- As vazões por metro de perfuração se mantêm praticamente constantes entre 40 e 120 m de profundidade. Pressente-se, mesmo, uma discreta tendência de queda com a profundidade;
- As profundidades mais frequentes situam-se entre os 50 e os 100 m. O histograma das profundidades (Figura 6.2) mostra uma distribuição de frequências que pode ser aproximada por uma distribuição normal com média de 75,2 m e desvio padrão de 18,8 m;
- Um número relativamente pequeno de poços desce abaixo dos 120 metros. A experiência da população local dita, na prática, esse limite de profundidade, abaixo do qual são pequenas as probabilidades de sucesso dos poços;
- Ocorrem esporadicamente descargas anormalmente altas em diferentes profundidades, entre os 30 e os 120 m, compatíveis com o caráter extremamente heterogêneo do meio cárstico.

Da mesma forma que nos calcários de São Desidério/BA, as características acima comentadas apontam para um comportamento cárstico restrito a uma fatia de terreno compreendida entre a superfície e a profundidade de 120 m, a menos de eventuais anomalias locais. É lícito, portanto, considerar a espessura do aquífero Lagoa do Jacaré como sendo de 120 metros. Considerando-se um

nível estático médio regional de 20 metros (média de 28 medições em 14 poços, ao longo do projeto), vamos trabalhar com uma espessura saturada de 100 metros para fins de avaliação da reserva.

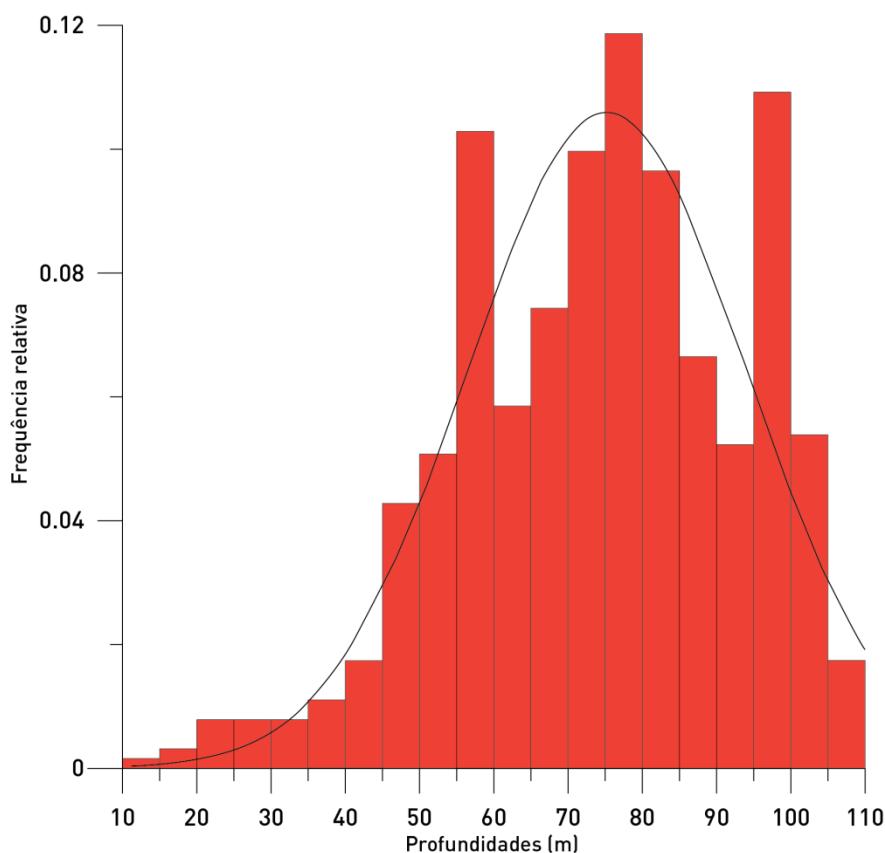


Figura 6.2: Histograma de profundidades dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

6.1 Litologia, estrutura e carstificação

De acordo com o mapa geológico ao milionésimo de Minas Gerais (CPRM/COMIG, 2003), ocorre, na área urbana de Montes Claros, o subgrupo Paraopeba indiviso. Para oeste da zona urbana, nas altas cotas da porção oeste da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira ocorre a Formação Lagoa do Jacaré constituída predominantemente de calcários escuros.

Chaves *et al.*, (2011), detalham posteriormente a região de Montes Claros (Figura 6.3), atribuindo duas fácies distintas à Formação Lagoa do Jacaré. Segundo esses autores, o sul da zona urbana de Montes Claros é ocupado por siltitos da porção inferior dessa formação. A porção superior, nas altas cotas do flanco oeste da bacia hidrográfica do rio do Vieira, é representada pelos mesmos calcários escuros acima citados que caracterizaram antes, sozinhos, a Formação Lagoa do Jacaré de CPRM/COMIG (2003).

Os autores informam, ainda, que a porção norte da zona urbana de Montes Claros é ocupada por sedimentos predominantemente silticos da Formação Serra de Santa Helena, posicionada estratigraficamente na base da Formação

Lagoa do Jacaré e gradando concordantemente para a porção basal desta última.

Em mapeamento da folha Jequitai, 80 km a SW de Montes Claros, CPRM/UFMG (2007) informam que o contato da Formação Serra de Santa Helena com a Formação Lagoa do Jacaré é nitidamente transicional em todos os locais onde pôde ser observado. Os autores mostraram, neste trabalho, que a base da Formação Lagoa do Jacaré é constituída, na área por eles estudada, por ritmitos formados por lâminas de argilito (mais claras) intercaladas por lâminas milimétricas de calcilutito (mais escuras).

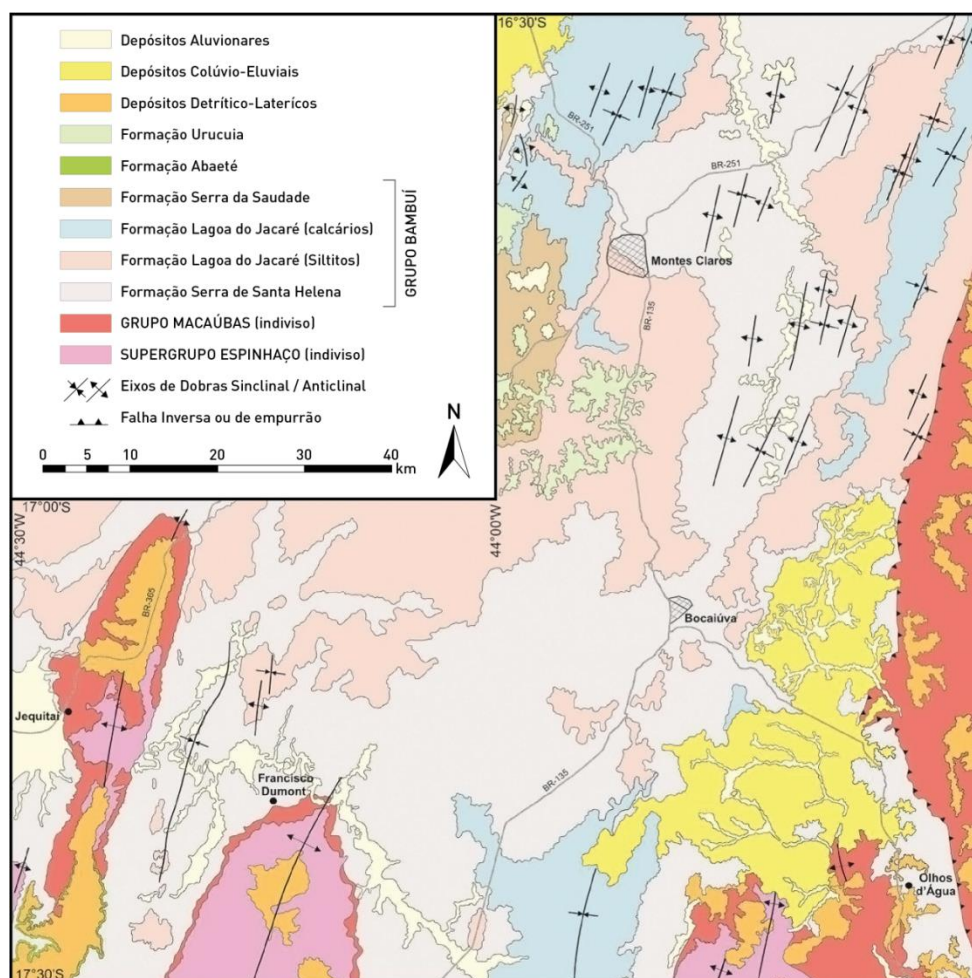


Figura 6.3: Geologia da região de Montes Claros, segundo Chaves *et al.* (2011).

No âmbito do presente estudo, as descrições de afloramentos apontam para uma ocorrência de siltitos e folhelhos com intercalações calcárias, na porção basal da Formação Lagoa do Jacaré. Nessa alternância entre material terrígeno e carbonatos, as camadas têm espessuras da ordem de metros, de modo que não se pode falar em ritmitos, como acontece em outras secções do Grupo Bambuí.

Uma análise de 36 poços Siagas com perfil litológico, na área piloto do rio do Vieira, mostra que apenas o poço CPRM 3100017010, ao norte do aeroporto, tem perfil predominantemente siltico com discretas intercalações de bancos calcários. Em todos os demais 35 poços as descrições litológicas do Siagas se

reportam sempre a calcário franco na área urbana de Montes Claros. Testemunhos de técnicos que trabalharam na perfuração desses poços, entretanto, dão conta de que o material atravessado era muito variado e não exclusivamente calcário.

Finalmente, a ocorrência da Formação Serra de Santa Helena no setor norte da área urbana, defendida por Chaves *et al.*, (2011), é aqui considerada como questionável, uma vez que não ocorrem as ardósias e siltitos amarelados e esverdeados que a caracterizam. O mapeamento realizado no presente estudo indica litologias mais compatíveis com a porção basal da Formação Lagoa do Jacaré.

6.1.1 Ensaios com traçadores – Aspectos Metodológicos

A aplicação de traçadores corantes visa investigar os caminhos preferenciais de fluxo hídrico ao longo das zonas de escoamento subterrâneo do aquífero cárstico, considerando-se a existência de uma bateria de poços em atividade e um poço para injeção do referido corante, em estado estacionário.

O uso de traçadores corantes é uma ferramenta de análise de conexões hidráulicas subterrâneas em diversos ambientes aquíferos, notadamente, os aquíferos cársticos. Aley & Fletcher (1976a), Smart *et al.* (1986), Quinlan (1987a), Mull *et al.* (1988), Aley (1999), Field (2002) e outros apresentam discussões amplas sobre a aplicação de traçadores corantes na determinação de rotas de fluxos subterrâneos e dos atributos hidrodinâmicos, considerando-se os aspectos metodológicos envolvidos e a necessária adequação dos procedimentos e das técnicas de investigação.

A execução dos ensaios com traçadores consistiu basicamente na injeção direta de corantes artificiais em poços tubulares de bombeamento, valendo-se do monitoramento contínuo da água para possível detecção desses corantes, através de uma bateria de poços em atividade, situados nas vizinhanças dos poços de injeção, em regime estacionário.

As etapas realizadas durante a execução desses ensaios são as seguintes:

- **1ª Etapa: Reconhecimento de Campo e Definição da Rede de Monitoramento**

Avaliação dos distintos aspectos geológicos estruturais, morfológicos e hidrológicos das bacias de inserção dos ensaios, e assim estabelecer os pontos favoráveis à injeção dos traçadores corantes e de sua detecção, de acordo com a disponibilidade de poços com autorização para servirem aos ensaios.

- **2ª Etapa: Planejamento e Execução do Ensaio**

Definição dos pontos de observação (poços ativos) como dispositivos de monitoramento / detecção dos corantes, poços tubulares de bombeamento que, mantidos sob regime contínuo de operação, possam ser amostrados durante um período não inferior a 72 horas contínuas. Nesses locais são realizadas duas campanhas de amostragem para o estudo de *background* de fluorescência das águas e uma campanha de amostragem de monitoramento contínuo no período de pós-injeção, para a potencial detecção dos traçadores.

Além da coleta manual das amostras de água são instalados dispositivos de carvão (fluocaptadores), que permitem o acúmulo das substâncias fluorescentes, enquanto os fluxos hídricos passam pelo dispositivo.

- **3ª Etapa: Coleta de *Background* para fluorescência**

Em geral, as águas podem conter substâncias que emitem fluorescência em comprimentos de onda semelhantes aos corantes que são utilizados.

Em vista da possibilidade de haver coincidência entre a resposta espectral de certos corantes com a resposta de substâncias contidas naturalmente nas águas circulantes (dada à presença de algas, matéria orgânica, etc.), a análise prévia das concentrações naturais torna-se de suma importância. Com isso, todo ensaio de traçador deve previamente avaliar as características de fluorescência natural das águas que circulem no meio em análise (*background*).

Foram realizadas três campanhas de coleta de amostras de água para *background*, nos meses de agosto e outubro do ano de 2014 e janeiro de 2015. Na primeira campanha, foram coletadas apenas amostras de água. As amostras de água passam por uma avaliação do pH. Em casos em que o meio é ácido torna-se necessário realizar um tamponamento, que é feito com uma solução básica de neutralização. Então, as amostras foram analisadas em espectrofotômetro de fluorescência (HITACHI F-2700).

Os dados gerados são visualizados em conjunto para a avaliação da intensidade de fluorescência e faixas do espectro de ocorrência dos picos de fluorescência relativos à presença de substâncias pertencentes ao ambiente em estudo. Esses valores são utilizados na comparação dos resultados obtidos na análise do material coletado após a injeção dos traçadores corantes.

- **4ª Etapa: Injeção de Traçadores Corantes**

A injeção de traçadores constitui na aplicação direta dos corantes selecionados para os ensaios nos poços de bombeamento estrategicamente definidos para uma provável medição em outros supostamente de descarga dos fluxos subterrâneos, onde são instalados detectores para absorção do traçador, qualitativa e/ou quantitativamente.

Os traçadores corantes definidos para os ensaios foram a Fluoresceína (ou Uranina), Amino G e a Rodamina WT.

- **5ª Etapa: Monitoramento após a Injeção dos Traçadores Corantes**

Para a detecção dos traçadores corantes injetados nos poços tubulares e o mapeamento das rotas de fluxo de água subterrânea, o monitoramento dos poços de bombeamento foi organizado em quatro etapas:

- Instalação de fluorímetros de campo nos poços de bombeamento em estudo;
- Instalação de carvão nos poços de bombeamento (fluocaptadores);
- Coleta manual de amostras de água;
- Leituras *in loco*, utilizando fluorímetros de mão modelo Aquafluor.

- **6ª Etapa: Análises laboratoriais**

Os corantes injetados no meio aquífero podem ser identificados por suas propriedades de fluorescência. Fluorescência é o fenômeno de emissão de luz associado ao movimento dos elétrons saindo de um estado excitado para o estado fundamental. No espectrofotômetro de fluorescência, a amostra absorve energia radiante da lâmpada de Xenônio pela excitação de elétrons nas moléculas de seus compostos e, quando esses retornam para o estado fundamental, emitem parte da energia na forma de luz. A luz emitida apresenta comprimento de onda maior e mais baixa energia que a luz de incidência.

A absorção das radiações e a emissão da luz fluorescente pela amostra dependem das estruturas das moléculas que a compõem e são características para cada substância química, sendo necessário, portanto, conhecer previamente os comprimentos de onda de máxima excitação e emissão das substâncias que se pretende estudar. Existem nos espectrofotômetros várias lentes e fendas que têm como objetivo colimar e selecionar os feixes de luz apropriados, ou seja, permitem selecionar o espectro de emissão ou/e de excitação.

Utilizando-se o espectrofotômetro de fluorescência (HITACHI F-2700), no modo WL-Scan (*Synchronous Scan*), é obtida para uma dada faixa do espectro selecionada, a curva de intensidade de fluorescência emitida pela amostra. A faixa do espectro selecionada para o estudo corresponde a um intervalo entre 450 nm e 600 nm e abrange os picos de máxima fluorescência dos corantes que foram utilizados no estudo. Os comprimentos de onda de excitação/emissão que produzem maior intensidade de fluorescência e que permitem caracterizar a Fluoresceína são 491 nm e 512 nm, e para a Rodamina WT são, respectivamente, 554 nm e 580 nm. Já para o Amino G os comprimentos de ondas de excitação/emissão são 260/520

As amostras de carvão, antes de serem analisadas, passam por um pré-tratamento com a finalidade de extrair as substâncias adsorvidas. Este tratamento consiste primeiramente em secar a amostra, retirando ao máximo a umidade presente nas partículas de carvão e, posteriormente, é adicionado um eluente capaz de desprender as substâncias retidas.

O eluente é uma solução que permite a liberação das substâncias adsorvidas no carvão para a fase líquida, após um tempo de imersão de aproximadamente 20 minutos. Parte da solução é armazenada em um frasco etiquetado para ser analisada e outra parte é armazenada como registro.

Cabe ressaltar que as amostras das águas devem passar por uma avaliação do pH antes de serem analisadas pelo espectrofotômetro de fluorescência. Em casos em que o meio é ácido torna-se necessário realizar um tamponamento, que é feito com uma solução básica de neutralização. As amostras foram analisadas em espectrofotômetro de fluorescência (HITACHI F-2700)

Os dados gerados são visualizados em conjunto para a avaliação da intensidade de fluorescência e faixas do espectro de ocorrência dos picos de fluorescência relativos à presença de substâncias pertencentes ao ambiente em estudo. Esses valores serão utilizados na comparação dos resultados obtidos na análise do material coletado após a aplicação dos corantes.

Os fluocaptadores são atados a uma corda de náilon® e então posicionados de modo que permaneçam junto à zona de maior saturação e frequência de fluxos

dos locais pretendidos. Os detectores de carvão, após a coleta, são acondicionados em frascos plásticos esterilizados, lacrados e transportados para o laboratório. De forma semelhante, as amostras de água coletadas foram reservadas em frascos plásticos estéreis para serem levadas até o laboratório.

Já os fluorímetros de campo foram instalados de forma a se obter leituras contínuas em intervalos pré-definidos, sendo registrados dados de leitura a cada 20 minutos para obtenção da curva de recuperação do(s) traçador(es).

- **7ª Etapa: Interpretação dos Resultados**

Os dados obtidos no experimento são inicialmente analisados de forma qualitativa, visando ao reconhecimento da conexão hidráulica entre o ponto de injeção e o ponto de monitoramento, pela presença ou não do traçador. A interpretação parte da comparação entre os resultados obtidos para água e carvão em cada ponto monitorado e aqueles valores obtidos durante a campanha de *background*, nos respectivos pontos. Assim, são identificados os resultados positivos e negativos em relação à presença dos traçadores investigados.

6.1.2 Ensaios com traçadores - Execução

Na área piloto do rio do Vieira, foram executados ensaios onde foi determinado um poço para injeção do corante e poços para monitoramento. O estudo visou identificar direções preferenciais de fluxo e uma estimativa da velocidade dos fluxos nos trechos avaliados. Os estudos foram estabelecidos para uma escala de investigação local, uma vez que os poços de injeção e os de monitoramento localizam-se a menos de 350 metros de distância.

Os ensaios foram realizados na área de ocorrência do Grupo Bambuí, especificamente da Fm. Lagoa do Jacaré. Foram selecionados para o ensaio 7 poços, em três localidades distintas: Rebentão dos Ferros, Bairro Santo Inácio e ETE Copasa (Tabela 6.1 e Figura 6.4). Em cada uma das localidades foi estabelecido um poço de injeção mais um ou dois poços de monitoramento. Os traçadores corantes definidos para esse ensaio foram o Amino G e a Fluoresceína (Uranina). Os ensaios tiveram início no dia 29 de janeiro de 2015, com a injeção dos corantes e monitoramento por 48 horas,

Tabela 6.1 Rede do Ensaio de Traçadores no Município de Montes Claros, MG.

Código Ponto	Local		Coordenadas		Descrição Geral do Ponto
			UTM E	UTM N	
Poço CO32	Rebentão dos Ferros	Montes Claros	615.581	8.157.479	Ponto de injeção de Amino G
Poço CO33			615.931	8.157.563	Ponto de monitoramento
Poço CO34	Bairro Santo Inácio		622.612	8.146.222	Ponto de injeção de Fluoresceína
Poço CO21			622.514	8.146.541	Ponto de monitoramento
Poço CO01	ETE Copasa		621.987	8.154.801	Ponto de injeção de Amino G
Poço 06			621.897	8.154.803	Ponto de monitoramento
Poço E-01			622.178	8.154.725	Ponto de Monitoramento

Na ETE COPASA foi injetado o traçador Amino G no Poço E-01 e monitorados os Poços C-01 (ETE) e Poço 06 pertencente à Coteminas. Conforme mostra a Figura 6.4, os resultados das análises de água indicaram que o traçador foi detectado no Poço 06.

O ensaio com traçadores no Rebentão dos Ferros baseou-se na injeção de Amino G no Poço C-32 e o monitoramento do Poço C-33. Durante todo o ensaio, após a injeção, o Poço C-32 ficou inoperante e o Poço C-33 manteve sua bomba ligada. A análise da água apontou a detecção do traçador no ponto monitorado.

Dentre os três alvos selecionados para os ensaios, verificou-se que em dois deles (ETE COPASA e Rebentão dos Ferros) houve confirmação da conexão hidráulica entre os poços investigados pela detecção dos corantes adicionados. As rotas verificadas pelos traçadores corantes têm direções gerais de WSW - ENE (fluxo entre os poços C32 a C33) e EW (fluxo do poço C-01 ao poço 6).

O resultado obtido no ensaio de traçadores na ETE COPASA indicou uma velocidade mínima de, aproximadamente, 1,38 m/h associada à direção E-W, considerando-se um tempo de trânsito relativo a um traçado em linha reta, de aproximadamente 42 horas. Ressalta-se que entre os pontos avaliados às margens do Rio do Vieira, o fluxo subterrâneo local transcorre perpendicularmente ao traçado do referido curso de água, reforçando a ideia de que em ambientes aquíferos cársticos, o contorno topográfico da hidrografia pouco serve às análises quantitativas de fluxos por bacias.

Por outro lado, o resultado obtido no ensaio de traçadores na localidade de Rebentão dos Ferros, indica uma velocidade mínima de, aproximadamente, 12,8 m/h, associadas à direção SW-NE, considerando-se um tempo de trânsito relativo ao traçado em linha reta, de aproximadamente 25,8 horas.

O valor de velocidade obtido entre os poços analisados ao redor da ETE COPASA, embora não signifique grandes anomalias para um ambiente aquífero cárstico-fissural (1,4 m/h), visto tratar-se de um valor mínimo em função das condições de sua realização, foi extremamente elucidativo, onde se confirmou a existência de uma conexão de subsuperfície que não obedece ao divisor hidráulico natural representado pelo Rio do Vieira.

Tais condições revelam, do ponto de vista hidrogeológico e ambiental, que o ambiente cárstico de Montes Claros, deve ser regulado em consonância aos limites físicos impostos pela distribuição espacial das ocorrências de rochas calcárias que conformam o próprio assoalho local, em detrimento do estabelecimento de limites de bacias hidrográficas (interflúvios), ou pseudo divisores físicos ou hidráulicos como rios ou zonas deprimidas no relevo, associadas a fundos de vale.

Na região de Montes Claros, além dos estudos com traçadores corantes, foram executadas investigações geofísicas a fim de se avaliar as características estruturais dos maciços e dar subsídios às pesquisas geológicas e hidrogeológicas. Foram utilizados os métodos de gravimetria e eletroresistividade em toda a área do projeto Piloto do rio do Vieira, que ocupa uma extensão de aproximadamente 580 km².

A associação dos resultados obtidos entre os dois métodos de investigação (geofísica e traçadores corantes) se torna limitada devido à diferença entre a escala de pesquisa. Os ensaios com traçadores corantes foram utilizados para observar possíveis conexões em escala local, entre poços localizados a menos de 350 metros de distância. Por outro lado, as investigações geofísicas visaram descrever propriedades do maciço em subsuperfície em uma escala regional.

Os resultados do estudo gravimétrico, partindo dos mapas de anomalia Bourguer e os mapas das derivadas nas direções E-W, N-S e vertical, mostraram uma anomalia negativa a oeste da cidade de Montes Claros, que foi interpretada, a princípio, como resposta do aumento localizado da espessura do Grupo Bambuí. Entretanto, como a anomalia foi decorrente de uma única

estação de medição, o resultado foi tomado com reservas, e uma malha mais detalhada foi indicada para esclarecimento dos resultados. Ressalta-se ainda, que a área da anomalia não abrange nenhuma das áreas investigadas com traçadores corantes.

A partir dos modelos com geometria 2D e 3D e dos cálculos de profundidade utilizando a equação de Euler, foi possível construir um mapa de variação da superfície de contraste gravimétrico em profundidade. Essa superfície foi interpretada como o substrato do Grupo Bambuí, representado pelo topo do Supergrupo Espinhaço. Conforme os mapas, essa superfície apresenta-se severamente movimentada, variando entre 650 metros de profundidade a 5.000 m. Essa arquitetura remete a falhamentos significativos. Foi destacado pelos autores do estudo geofísico o alinhamento NW-SE de faixas de grande espessura, além de faixas de espessura rasa do Grupo Bambuí.

Os estudos de eletroresistividade consistiram em 54 sondagens elétricas verticais na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. O comprimento da linha AB de emissão de corrente variou entre 2.000 e 4.000 m. Os resultados foram traduzidos em um modelo geoelétrico de quatro horizontes, que foram relacionados a interpretações litológicas e estratigráficas. A interpretação dos resultados mostrou que a investigação não ultrapassou a profundidade limite da Fm. Lagoa do Jacaré. O horizonte 2 foi indicado como a zona aquífera mais importante da área, onde a resistência transversal alta verificada significa que a zona aquífera é mais espessa e/ou mais carstificada. É nesse horizonte onde estão situadas as entradas de água nos calcários verificadas na descrição dos perfis dos poços avaliados na região.

Dentre as interpretações obtidas, destaca-se a existência de estruturas em pequena profundidade na direção NW-SE, marcadas pelo resultado da eletroresistividade. Essas estruturas reforçam a hipótese que propõe o papel dos fraturamentos NW-SE como direções preferenciais de carstificação. Esse fraturamento pode ser reflexo da estruturação profunda do substrato, conforme sugerido pela gravimetria.

6.2 Zoneamento de vazões da área piloto

Para a obtenção do zoneamento de vazões foram utilizados 595 poços do Siagas com vazão informada. Esse zoneamento é mostrado na Figura 6.5. A área de ocorrência dos poços é maior que a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, chegando a 1400 km². Na zona urbana de Montes Claros, onde se concentram os poços, as vazões ficam comumente entre 20 e 30 m³/h.

Observam-se, entretanto, zonas isoladas onde as vazões ficam acima de 40 m³/h, podendo alcançar 100 m³/h. Essas zonas são, aparentemente, alinhadas nas direções NNE-SSW, E-W e NW-SE. Essas direções, em ordem decrescente de conspicuidade, são direções de lineações observáveis em imagem *Google Earth* (Figura 6.5). O alinhamento NW-SE de altas vazões corta, indiferentemente, os calcários superiores da Formação Lagoa do Jacaré e os siltitos/calcários da porção basal dessa formação. Os poços C-051 e os poços CPRM 3100013276 e 3100013277 atestam esse fato. Aparentemente, portanto, ocorrem carstificações ou fraturamentos importantes na porção basal da Formação Lagoa do Jacaré.

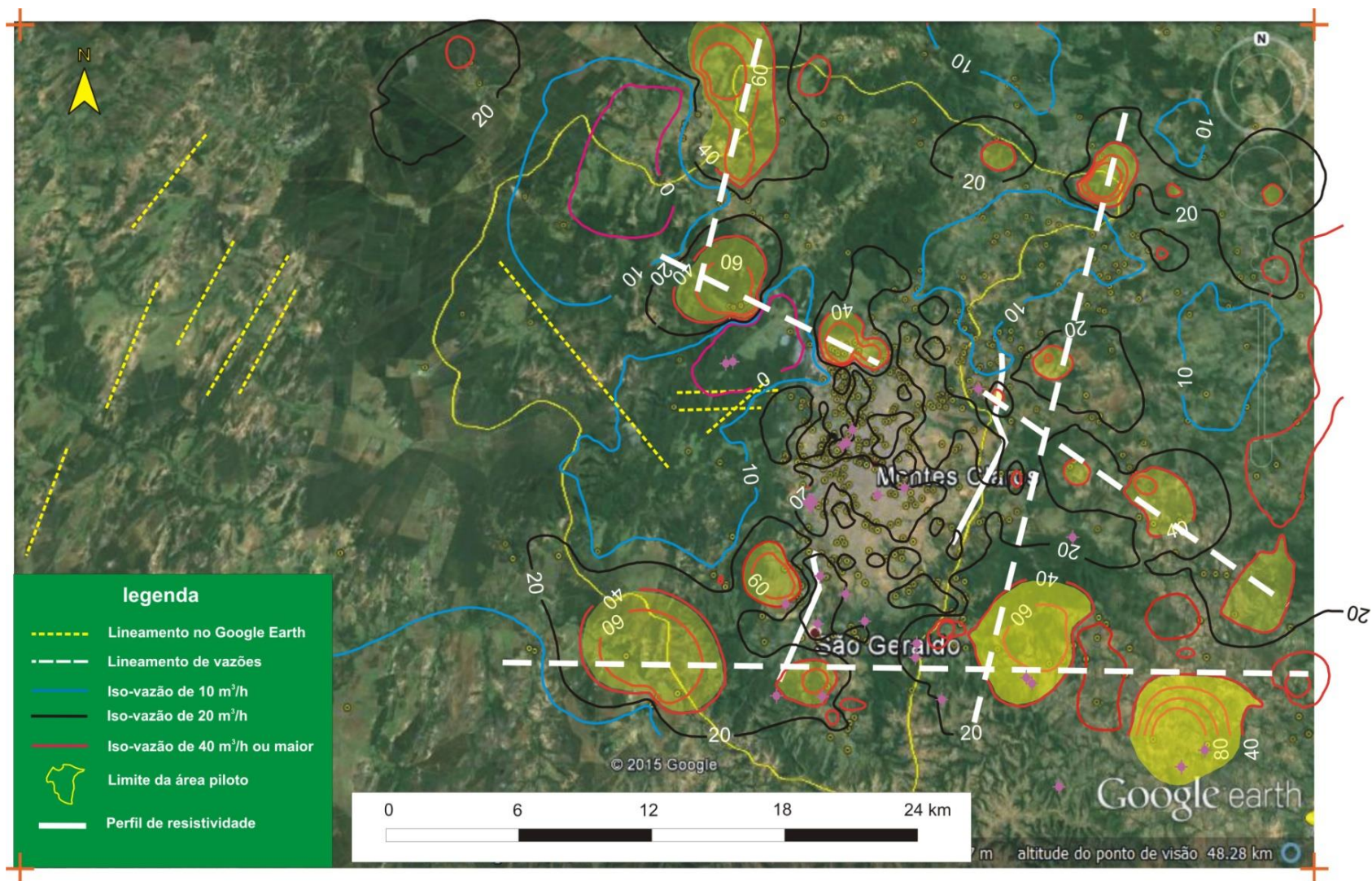


Figura 6.5: Zoneamento de vazões na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

6.3 Parâmetros hidrodinâmicos

Os parâmetros hidrodinâmicos na área piloto do rio do Vieira foram avaliados a partir da realização de cinco testes de aquífero, para os quais foram selecionados os seguintes Poços:

1. Poço CO26 – Almoxarifado COPASA
2. Poço CO27 – Bairro Cristo Rei
3. Poço CO29 – Bairro Independência
4. Poço ETE COPASA
5. Poço CO32 em Rebentão dos Ferros

A Figura 6.6 apresenta a localização dos 5 conjuntos de poços. Esses testes foram escalonados entre 2014 e 2015. Seus resultados são discutidos a seguir.

Nos testes de bombeamento realizados, as variações do nível de água foram monitoradas por sensores transdutores de pressão tipo *Levellogger Solinst* Modelo 3001 LT F100/M300. As medições de vazão foram levadas a efeito através de equipamento ultrassônico Modelo FDT-21/S2H da OMEGA, instalado em tubulação nova de PVC.

Antes da execução de cada teste foram realizados pré-testes para estimar a vazão *constante* a ser bombeada, mediante regulação da saída do fluxo do poço através um registro tipo Globo. Esse é o procedimento que normalmente se utiliza em testes de aquífero realizados em meios porosos homogêneos já que os modelos analíticos clássicos de avaliação de parâmetros hidráulicos exigem que a vazão seja constante. Por conta disso, na maioria dos casos os bombeamentos foram feitos com vazões inferiores às existentes em operação. No caso em estudo, verifica-se que a metodologia proposta no item 6.4.1 permite que os testes sejam feitos com vazão constante ou variável, dispensando o uso de registro para manter a vazão constante.

6.3.1 Metodologia para a análise dos testes de aquífero

6.3.1.1 Método baseado na produção dos poços no crivo da bomba

Para o Sistema de Condutores Hidráulicos Bambuí (SCHB) foi utilizado o método da capacidade específica fractal (Manoel Filho, 1996). Trata-se de um método prático e rápido que permite avaliar a capacidade de produção do poço em regime de funcionamento “sustentável” até o alcance do crivo da bomba. Assim sendo é possível avaliar a produção global de água nas áreas pilotos e obter subsídios para a gestão da exploração de água subterrânea com uma incerteza muito menor do que aquela que seria possível obter usando parâmetros hidráulicos determinados através de modelos computacionais concebidos para meios contínuos e homogêneos, quando se sabe que o meio cárstico-fissural é descontínuo e heterogêneo.

O modelo proposto tem como base as seguintes hipóteses:

- O poço é o único elemento que liga o subdomínio no qual ele se encontra, ao mundo exterior;

- O subdomínio e o poço constituem um *condutor hidráulico* ou *reservatório subterrâneo isolado*, de volume desconhecido (rede de vazios produzidos por fraturas ou por dissolução cárstica, na qual o poço penetra);
- O condutor hidráulico pode conter apenas um ou muitos poços, mas em cada poço o nível dinâmico sempre tenderá para o crivo da bomba após um tempo que depende da vazão bombeada. *A priori* esse tempo não pode ser determinado;
- O rebaixamento máximo permissível (RMP) é dado pela diferença entre as profundidades do crivo da bomba e do nível estático;
- A vazão do poço pode ser constante ou variável e a capacidade específica Q/s [m³/h.m] é aproximada por uma capacidade específica fractal Q^*/s^D de dimensão $[L^3 T^{-1} L^{-1}] = [L^2 T^{-1}]$, sendo Q^* uma vazão constante de dimensão $[L^3 T^{-1}]$ e s^D um rebaixamento fractal de dimensão $[L^D]$;
- O parâmetro D , desse modelo, caracteriza a variabilidade da vazão durante o teste e tem o seguinte significado:
 - $D < 1$ indica que houve uma variação crescente da vazão do teste e implica numa dimensão do fluxo menor do que 3;
 - $D > 1$ indica uma variação decrescente da vazão do teste e implica numa dimensão do fluxo maior do que 3;
 - $D = 1$ indica uma variação nula (teste com vazão constante) e implica numa dimensão do fluxo igual a 3;
- O regime de vazão constante fica caracterizado no gráfico $\log s^D \times \left(\frac{Q}{s}\right)$ de rebaixamento fractal versus capacidade específica;
- Com os dados de vazão e rebaixamento obtidos no teste de produção do poço (no condutor hidráulico e não no aquífero), o método permite avaliar, através de um simples gráfico de rebaixamento em função da vazão específica, a capacidade de produção “sustentável” do poço até atingir o crivo da bomba. Admite-se que antes que isso aconteça, o poço deve funcionar em condições sustentáveis;
- No estágio atual de exploração, nas áreas piloto de São Desidério, Lapão e Montes Claros os poços já funcionam em regime de exploração há muito tempo e o sistema de condutores hidráulicos Bambuí (SCHB) se encontra em regime dinâmico, não havendo como “recuperar” em pouco tempo as condições iniciais. Isto porque o nível atual de cada um dos poços resulta do seu próprio bombeamento e das interferências produzidas pelos poços produtores vizinhos, ao longo de décadas de extração de água. A interpretação dos testes nessas condições se baseia no princípio da superposição dos escoamentos. Ademais, por se

tratar de domínio cárstico, essa interpretação fica restrita à avaliação da capacidade específica dos poços, à luz dos registros de níveis obtidos através de *dataloggers*. Em última instância é essa capacidade que interessa conhecer para fins de gestão dos recursos hídricos.

6.3.1.2 Método baseado nos parâmetros hidráulicos do meio fraturado

Considerando, porém, que um dos objetivos estabelecidos nos TDRs é a obtenção de parâmetros hidráulicos do meio para fins de estimativa de fluxo regional e de reservas permanentes, a hipótese de meio contínuo equivalente (MCE) deverá ser considerada. Todavia, a utilização dos parâmetros hidráulicos deve ser feita com as ressalvas apresentadas na introdução, pois o meio descontínuo de geometria desconhecida do SCHB é substituído por um meio *contínuo macroscópico* ou *contínuo Darciniano* (Freeze & Cherry, 1979), no qual cada ponto corresponde a um Elemento de Volume Representativo (EVR).

6.3.2 Testes realizados na área piloto da Bacia do Rio do Vieira

6.3.2.1 Testes do Poço CO26 – Almoxarifado COPASA

O mapa da Figura 6.6 mostra a localização do poço CO26 testado no Almoxarifado da COPASA em Montes Claros/MG. Não foram encontrados nas vizinhanças do Almoxarifado poços para observação. O poço mais próximo identificado é o CO27 situado no Bairro Cristo Rei a 1910 m de distância e que também foi submetido a teste de bombeamento como será visto no item 6.3.2.2.

As planilhas dos testes dos Poços CO26 – Almoxarifado COPASA e CO27 – Bairro Cristo Rei podem ser analisadas nos ANEXOS 2.2.1 e 2.2.5, respectivamente.

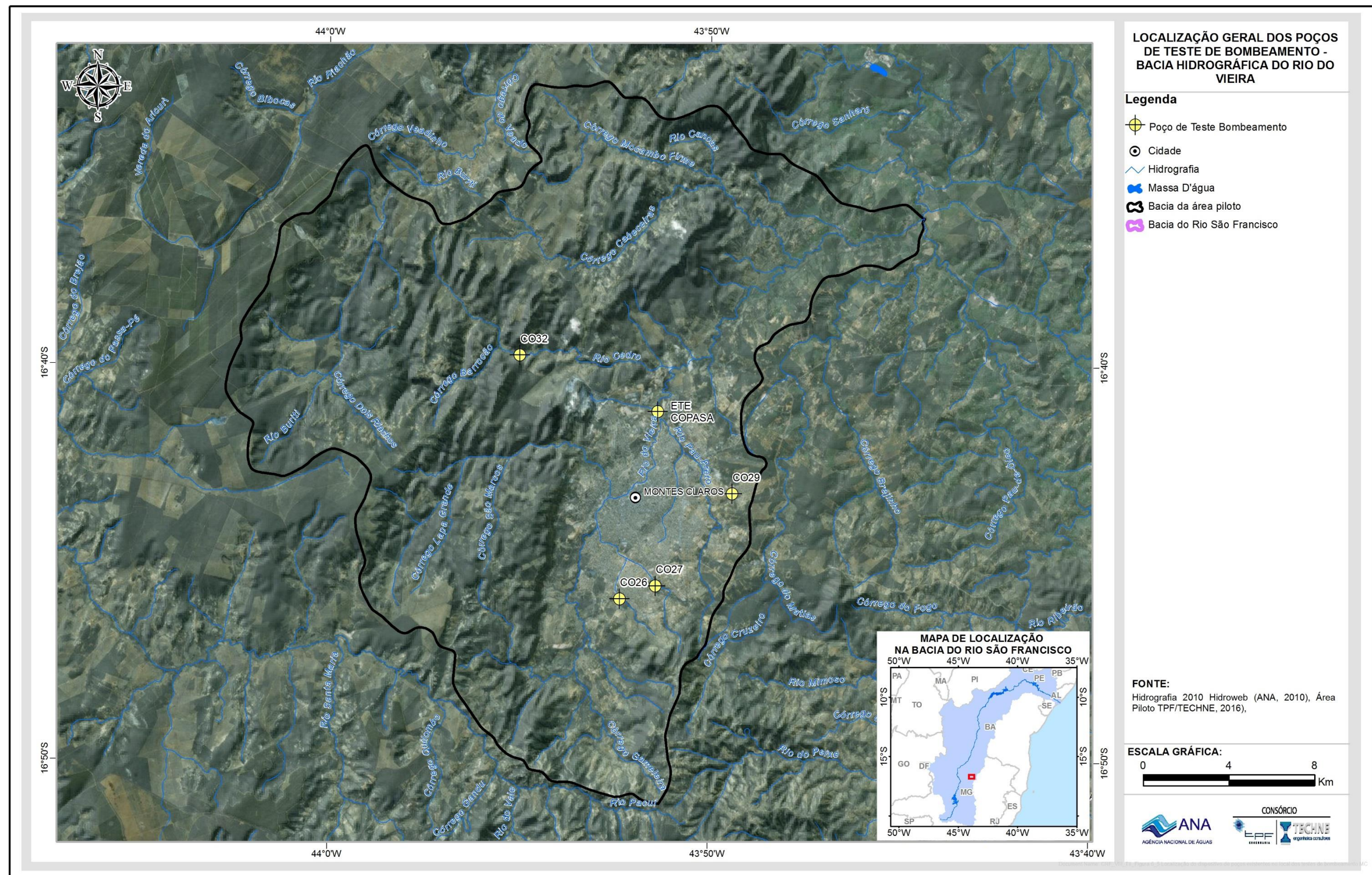


Figura 6.6: Localização dos 5 conjuntos de poços para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos em Montes Claros/MG.

De acordo com o perfil litológico e construtivo do poço CO26 testado no Almoxarifado da COPASA em Montes Claros/MG, o condutor hidráulico cárstico fraturado (Figura 6.7) apresenta entradas de água a 28, 31, 37, 71 e 83 m de profundidade.

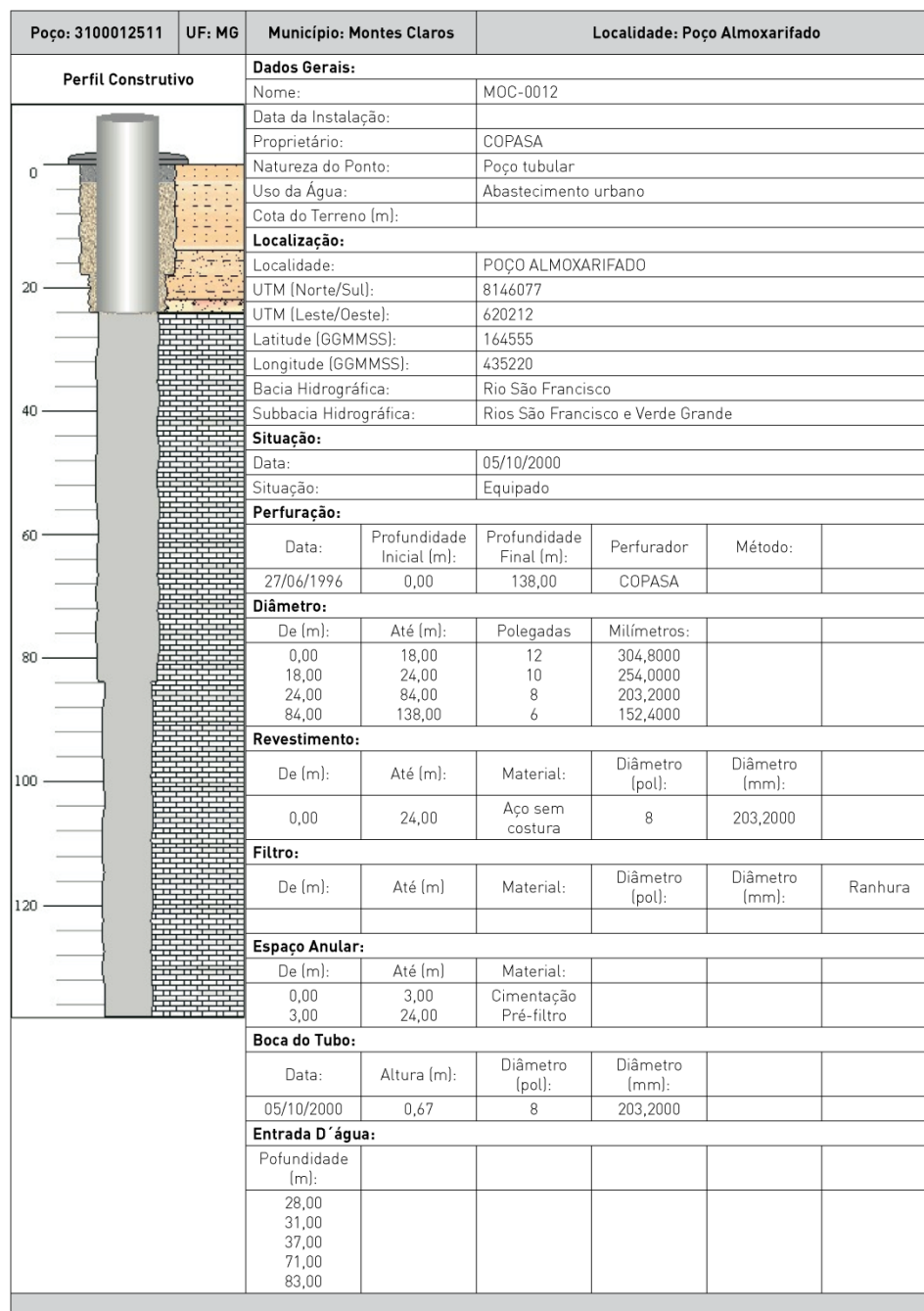


Figura 6.7: Perfil litológico e construtivo do poço CO26 situado no Almoxarifado da COPASA em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100012511). Condutor hidráulico cárstico fissural com entradas de água a 28, 31, 37, 71 e 83 m de profundidade.

Teste CO26 em julho de 1996 usando Compressor

- Capacidade específica

Devido ao uso de compressor no teste de bombeamento a variação da vazão foi de 101,4 a 10,5 L/s ou de 365,1 a 37,9 m³/h, conforme ilustrado pela curva de rebaixamento em função da capacidade específica, apresentada na Figura 6.8.

Essa ampla variação de vazão resulta da turbulência no fluxo dentro do poço produzida pelo sistema de bombeamento *air-lift* que dá origem a um rebaixamento de dimensão fractal $D=1,6582$. Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica fractal decrescente de 365,15 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) a 0,97 m³/h.m para um rebaixamento 35,82 m, estimado para uma submersão dinâmica de 70%, no nível do “injetor” do sistema de bombeamento. A primeira medida de vazão foi feita aos 20 minutos e indicou um valor de 12,5 L/s, que se reduziu para 10,5 L/s aos 1440 minutos, com o sistema *air lift* funcionando com 73% de submersão dinâmica.

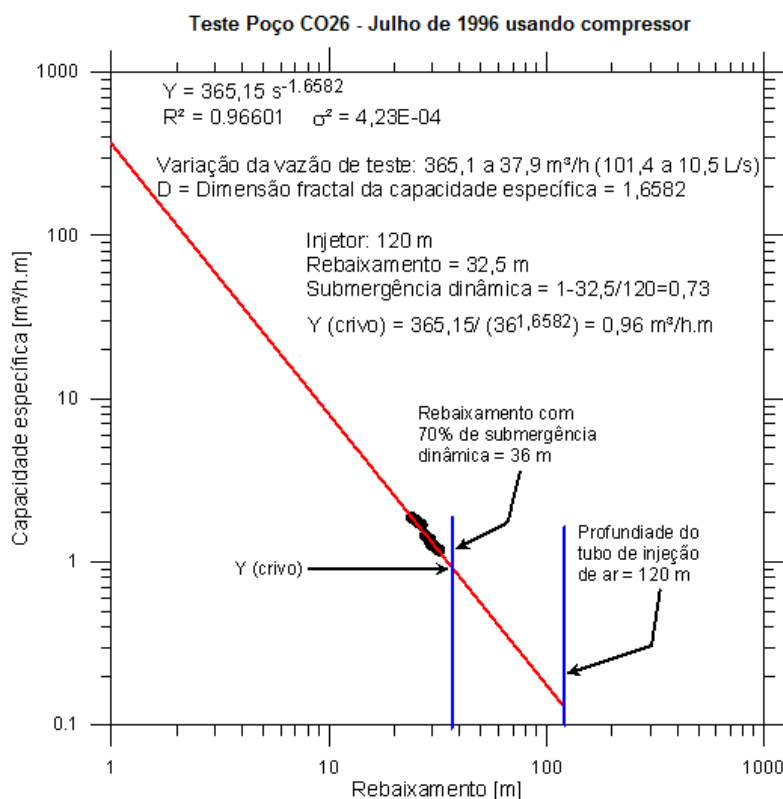


Figura 6.8: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almojarifado COPASA em Montes Claros/MG.

- Parâmetros hidrodinâmicos

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO26 Almojarifado da COPASA com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.9), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado Almojarifado COPASA para $D = 1,6582$ (vazão constante de 101 L/s) em Montes Claros/MG.

Poço	Q (m ³ /s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
C26 julho 96B	1,05E-01	1200	200	10	4,0	100	0,2	1,6582

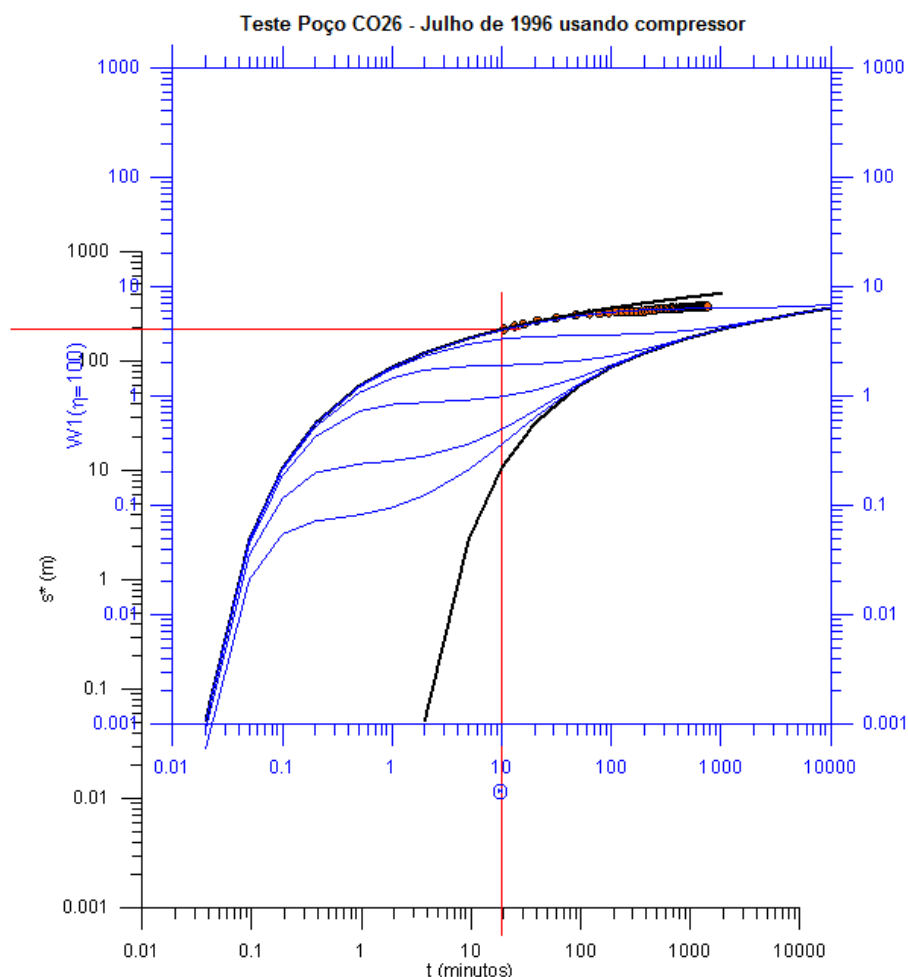


Figura 6.9: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almojarifado COPASA (Modelo de Boulton 1963).

Tabela 6.3 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado Almojarifado COPASA – Montes Claros/MG.

Poço	Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
CO26 julho 96B	1,61E-04	7,72E-04	0,586	2,74E-07

*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

Teste CO26 em novembro de 2004

- Capacidade específica

Com o aumento da submersão estática de 120 m (julho de 1996) para 134 m (novembro de 2004), a variação da vazão foi de 197 a 10,5 L/s ou de 709,16 a 37,9 m³/h, conforme ilustrado pela curva de rebaixamento em função da capacidade específica, apresentada na Figura 6.10.

Essa ampla variação de vazão resulta da turbulência no fluxo dentro do poço produzida pelo sistema de bombeamento *air-lift* que dá origem a um rebaixamento de dimensão fractal $D=1,8516$. Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica fractal decrescente de 709,16 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) a 0,76 m³/h.m para um rebaixamento 40,2 m, estimado para uma submersão dinâmica de 70%, no nível do “injetor” do sistema de bombeamento. A primeira medida de vazão foi feita aos 20 minutos e indicou um valor de 13,3 L/s, que se reduziu duas horas depois, para 10,5 L/s permanecendo constante até o final do teste aos 1440 minutos, com o sistema *air-lift* funcionando com 73% de submersão dinâmica. Comparando esse teste com o de julho 1996 ($Y=0,93$ m³/h.m), verifica-se que para maior rebaixamento a capacidade específica no “crivo” tende a ser menor ($Y=0,76$ m³/h.m).

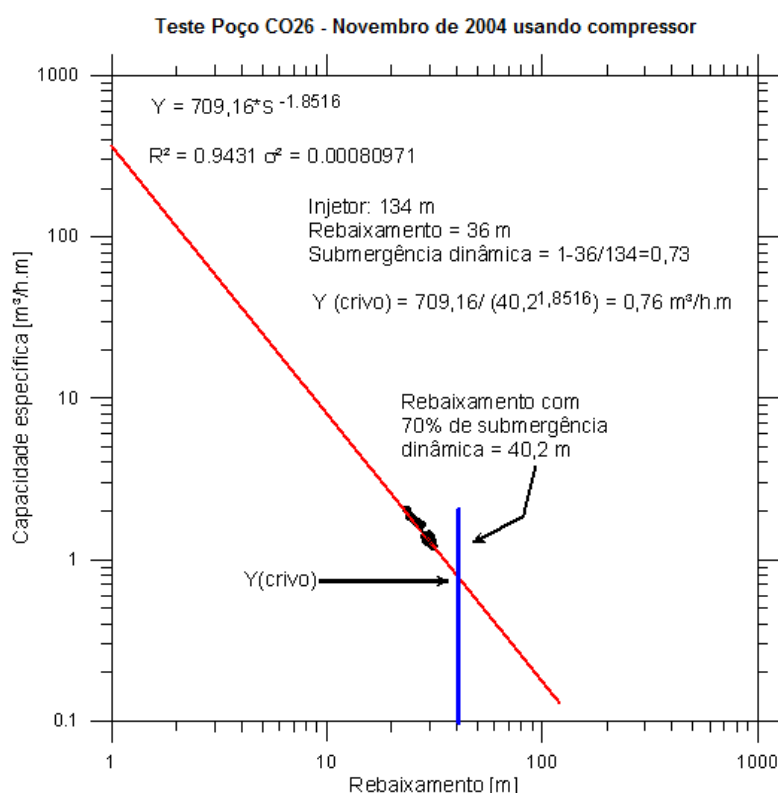


Figura 6.10: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almojarifado COPASA em Montes Claros/MG.

- Parâmetros hidrodinâmicos

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO26 Almoxarifado da COPASA em novembro de 2004 com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.11), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
CO26- nov.04	1,97E-01	7200	500	1	3	1000	0,2	1,8616

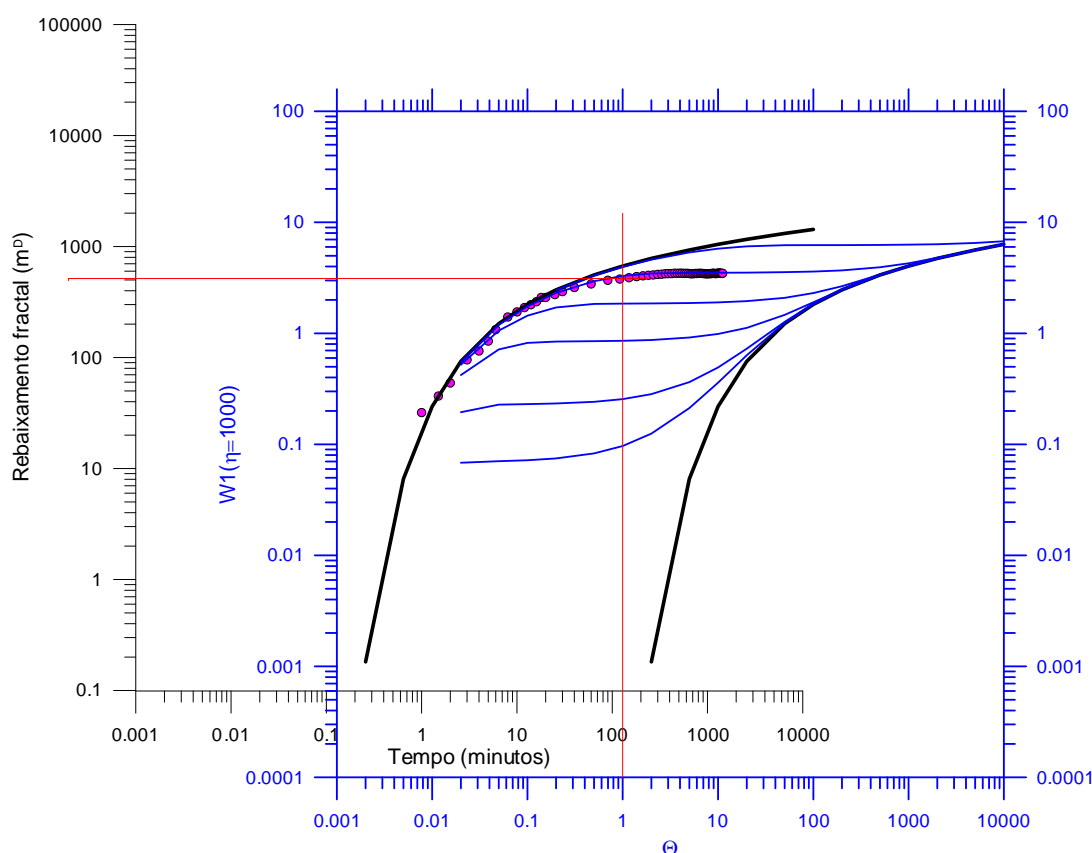


Figura 6.11: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA em julho de 1996 (Modelo de Boulton 1963).

Tabela 6.5 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.

Poço	Tf (m²/s)	Sf	a (mm)	Kf (m/s)
CO26 – nov. 2004	9,41E-05	2,71E-02	0,490	1,92E-07

Teste CO26 em março de 2014

- Capacidade específica

Com a redução da submersão estática de 134 m (novembro de 2004) para 130 m (março de 2014), a variação da vazão foi de 95,7 a 10,5 L/s ou de 344,36 a 37,9 m³/h, conforme ilustrado pela curva de rebaixamento em função da capacidade específica, apresentada na Figura 6.12.

Essa ampla variação de vazão resulta da turbulência no fluxo dentro do poço produzida pelo sistema de bombeamento *air-lift* que dá origem a um rebaixamento de dimensão fractal $D=1,6249$. Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica fractal decrescente de 344,36 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) a 0,89 m³/h.m para um rebaixamento 39 m, estimado para uma submersão dinâmica de 70%, no nível do “injetor” do sistema de bombeamento. A primeira medida de vazão foi feita aos 20 minutos e indicou um valor de 12,5 L/s, que se reduziu nove horas depois, para 10,5 L/s permanecendo constante até o final do teste aos 1440 minutos, com o sistema *air lift* funcionando com 74% de submersão dinâmica. Comparando esse teste com o de novembro de 2004 ($Y=0,76$ m³/h.m), verifica-se que para menor rebaixamento a capacidade específica no “crivo” tende a ser maior ($Y=0,89$ m³/h.m).

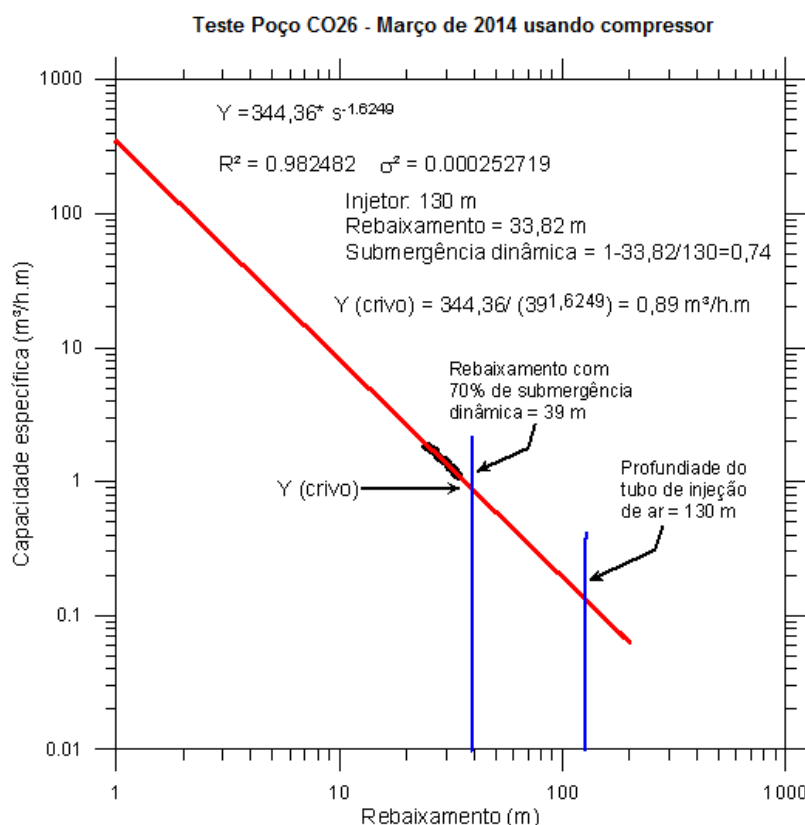


Figura 6.12: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almojarifado COPASA em Montes Claros - MG testado em março de 2014.

- Parâmetros hidrodinâmicos

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO26 Almoxarifado da COPASA em março de 2014 com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.13), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado C26 Almoxarifado COPASA em março de 2014.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
CO26- março de 2014	9,57E-02	6000	280	10	3,1	100	0,2	1,6249

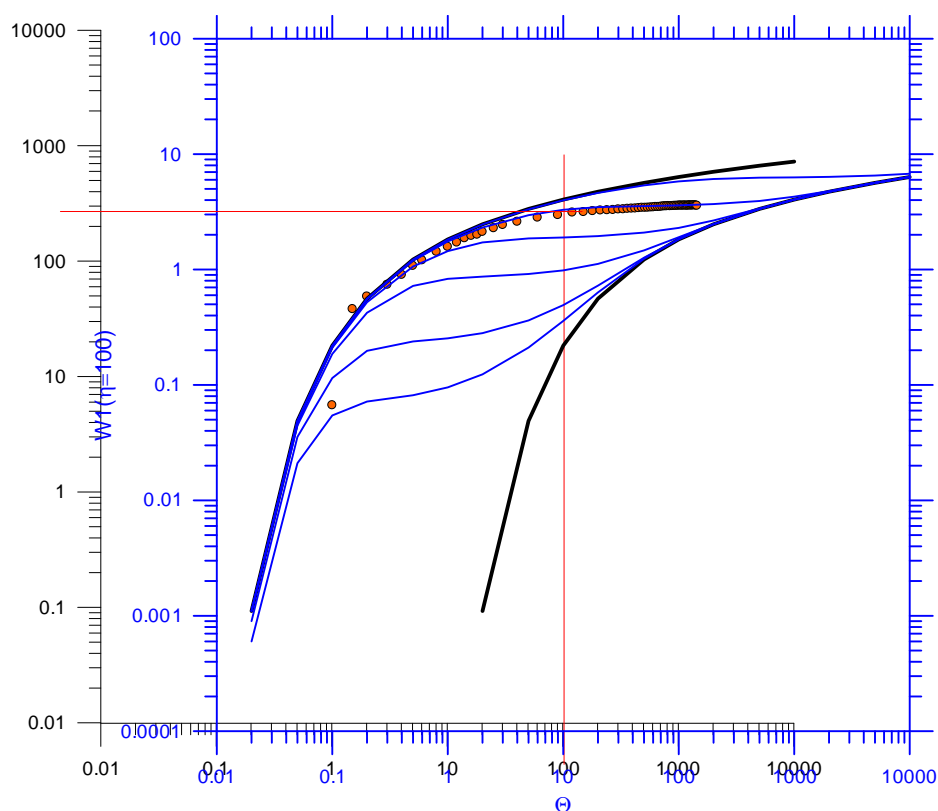


Figura 6.13: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almoxarifado COPASA em março de 2014 (Modelo de Boulton 1963).

Tabela 6.7 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento (março/14) do poço bombeado Almoxarifado COPASA – Montes Claros/MG.

Poço	Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
CO26 – março de 2014	8,43E-05	2,02E-03	0,473	1,78E-07

*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

Teste CO26 em março de 2015

- Capacidade específica

Com a utilização de bomba submersa o teste do poço CO26 do Almoxarifado da COPASA em Montes Claros foi realizado com vazão praticamente constante, variável de 21,03 a 18,97 m³/h, conforme ilustrado pela curva de rebaixamento em função da capacidade específica, apresentada na Figura 6.14.

Essa pequena variação de vazão resulta da pouca turbulência no fluxo dentro do poço produzida pelo sistema de bombeamento que dá origem a um rebaixamento de dimensão fractal D=1,0901. Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica fractal decrescente de 24,91 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) a 0,95 m³/h.m para um rebaixamento de 20 m. A variação da vazão ocorreu desde o início do teste até o seu final, após 72 horas de bombeamento.

Comparando esse teste com os 3 (três) anteriores, verifica-se que a capacidade específica decresce com o rebaixamento, conforme revelam os seguintes resultados de (rebaixamento, vazão específica): março de 2015 (20 m, 0,95 m³/m); julho de 1997 (36 m, 0,93 m³/m); março de 2014 (39 m, 0,89 m³/m) e novembro de 2004 (40,2 m, 0,76 m³/m). Nos meios fraturados o nível dinâmico sempre tende para o crivo da bomba.

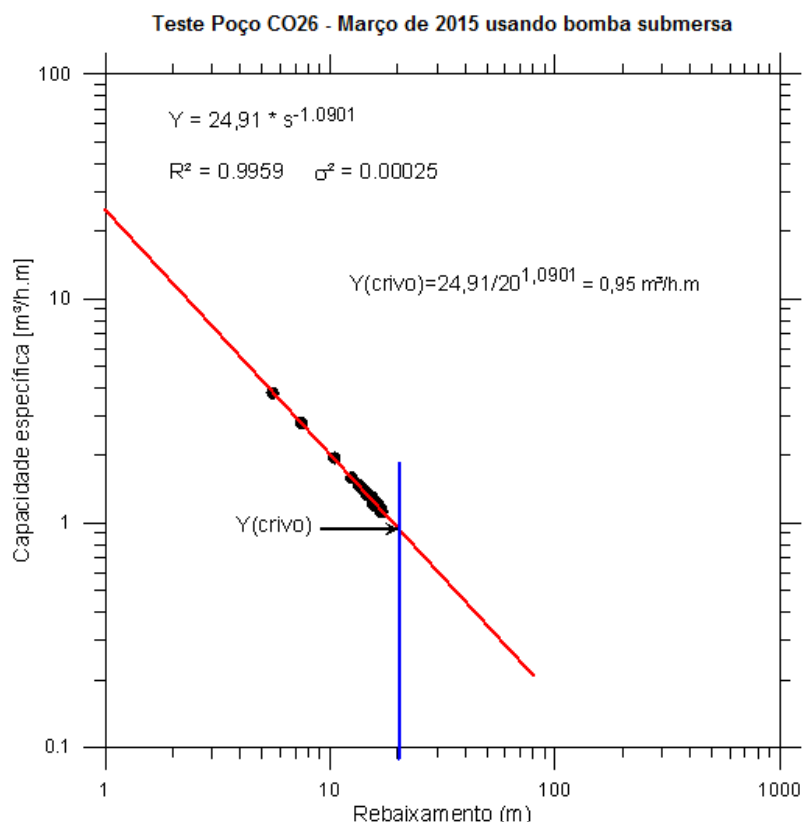


Figura 6.14: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO26 Almojarifado COPASA em Montes Claros - MG testado em março de 2015.

- Parâmetros hidrodinâmicos

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO26 Almojarifado da COPASA em março de 2015 com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.15), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO26 Almojarifado COPASA em março de 2014.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	$W\Theta$	η	r/B	D
CO26 - março de 2015	5,27E-03	120000	17	10	3,5	1000	0,2	1,0901

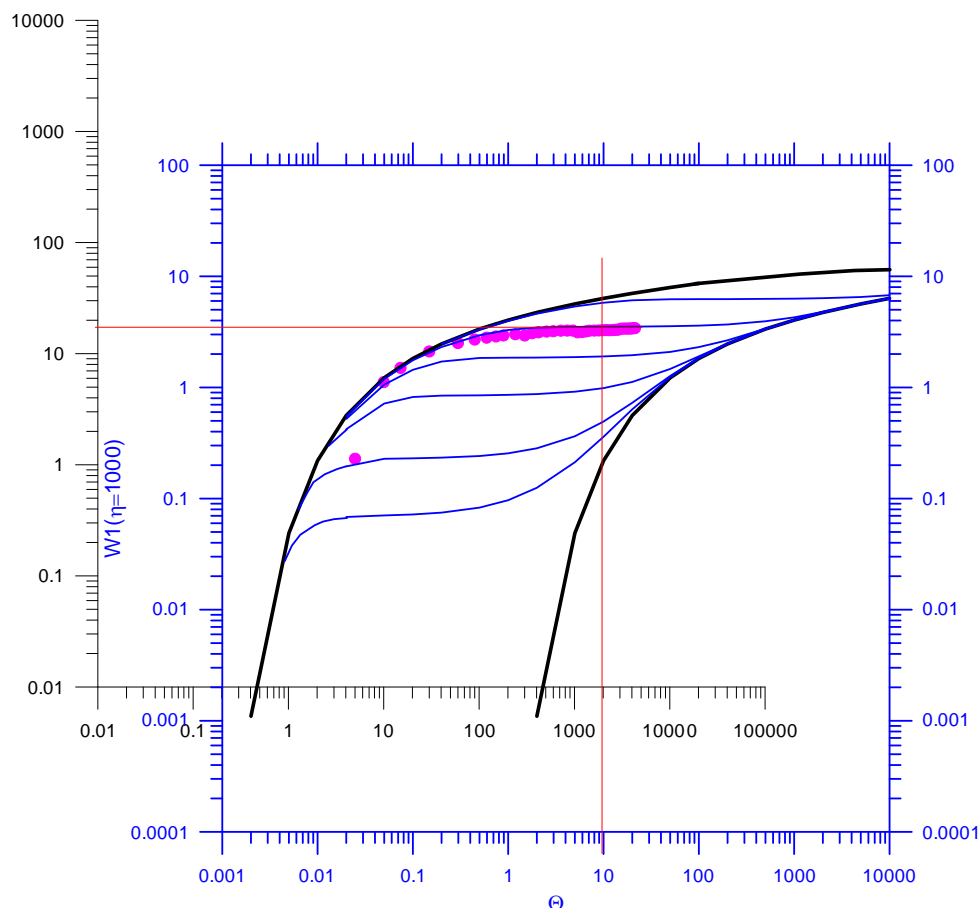


Figura 6.15: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço bombeado CO26 Almojarifado COPASA pelo método de superposição de escoamentos usando o (Modelo de Boulton 1963).

Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado Almojarifado COPASA – Montes Claros/MG.

Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
8,63E-05	4,14E-02	0,476	1,81E-07

*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

6.3.2.2 Teste Poço CO27 – Cristo Rei

O mapa da Figura 6.6 mostra a localização do poço CO27 testado no Bairro Cristo Rei em Montes Claros – MG. Não foram encontrados nas vizinhanças poços para observação. O poço mais próximo identificado é o C26 situado 1910m a sudoeste, no Almojarifado da COPASA, cujos testes foram analisados no item 6.3.2.1.

Não foi encontrado perfil litológico e construtivo do poço CO27 no Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, mas se dispõe do perfil construtivo elaborado pela Divisão de Água Subterrânea da COPASA Montes Claros, conforme é apresentado na Figura 6.16. Quanto à litologia e tipo de aquífero, a ficha técnica do poço indica apenas a existência de 12 m de cobertura e 123 m de rocha e que o aquífero é do tipo fissuro-cárstico, pertencente ao Grupo Bambuí.

PERFIL CONSTRUTIVO E LITOLÓGICO DO POÇO BOMBEADO C-27							
COPASA MG		RELATÓRIO FINAL DE POÇO DIVISÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - DVAS				Município: Monte Claros Poço N°: C-27	
LOCALIDADE: Sede (Bairro Cristo Rei)					CÓDIGO CONTÁBIL:		
PROGRAMA: Investimento Copasa		CONTRATO N°:		BM N°:			
DATA DE INÍCIO: 28/06/96		DATA DE TÉRMINO: 03/07/96		EXECUTOR: COPASA MG			
SONDA: R-1H N° 04		MÉTODO: Roto-Pneumático		SONDADOR: Elpídio/Claudionor			
FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Grupo Bambuí				AQUÍFERO: Fendilhado			
COBERTURA: (m) 12,00		ROCHA: (m) 123,00		LATITUDE:		LONGITUDE:	COTA:
PERFURAÇÃO				REVESTIMENTO			
DIÂM. (mm)	INTRVALO	PROF. DE FENDAS (m)		DIÂM. (mm)	POSIÇÃO	TIPO	
300	0,00 a 12,00	14,00 ; 16,00		200	1,00 a 0,00	saliência	
250	12,00 a 17,50	23,00		200	0,00 a 17,50	tubo	
200	17,50 a 84,00	24,00 ; 26,00					
150	84,00 a 135,00	27,00 ; 29,00					
		30,00 ; 51,00					
		53,00 ; 72,00					
TOTAL: 135,00m							
ESPECIFICAÇÃO DO REVESTIMENTO							
TUBO:							
aço galvanizado din 2440							
FILTRO							
LAJE DE PROTEÇÃO (DIMENSÕES/MAT./QUANT.)							
(2,00m x 2,00m) X 0,20m							
TUBO PARA REALIMENTAR PRÉ-FILTRO (MAT./DIÂM.COMP.)							
				TOTAL DE TUBO: 18,50m		TOTAL DE FILTRO:	
COMPLEMENTAÇÃO (ENVOLTÓRIO DO REVESTIMENTO)							
MATERIAL (ESPECIFICAÇÃO)				POSIÇÃO		QUANTIDADE	
cimentação				0,00 a 17,50			
DESENVOLVIMENTO				DESINFECÇÃO /REMOÇÃO DE BENTONITA			
MÉTODO		TEMPO (H)		PRODUTO QUÍMICO		QUANT. (gr.)	
TESTE DE BOMBEAMENTO							
TESTE	DATA	EQUIPAMENTO	DURAÇÃO (h)	PROF. (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	VAZÃO (l/s)
01	26/07/95	Comp. Wayne 120 pcm	24:00	135,00	1,32	26,90	11,11
02	01/04/14	Comp. 200 pcm (UT-06)	24:00	135,00	0,00	34,85	11,11
Km PERCORRIDO: 5,0 Km							
RESPONSÁVEL: Claudionor Rodrigues da Silva						DATA: 04/07/96	
winwod/myrian/rnocsesta.doc - Montes Claros - Sede - C 27							

Figura 6.16: Perfil construtivo do poço CO27 Cristo Rei em Montes Claros/MG. Trata-se de condutor hidráulico cárstico fissural com entradas não indicadas.

Vazão do teste

Apesar de ter sido realizado com a utilização de bomba submersa o teste do poço CO27 no Bairro Cristo Rei em Montes Claros foi realizado com vazão variável decrescente de 6,74 L/s (24,3 m³/h) a 3,98 L/s (14,3 m³/h) conforme ilustrado pela curva apresentada na Figura 6.17. Ao que tudo indica, isto se explica pelo fato de tratar-se de um poço jorrante, no qual a tendência de decaimento da descarga com o tempo é perfeitamente natural, como se observa fixando a visão sobre os pontos mais baixos do gráfico, aos quais se poderia até ajustar uma curva de decaimento. Todavia, dadas às condições do revestimento da boca do poço, não foi possível avaliar a carga hidráulica inicial (ou seja, o nível estático inicial) e este foi considerado como o nível do terreno natural (Figura 6.18).

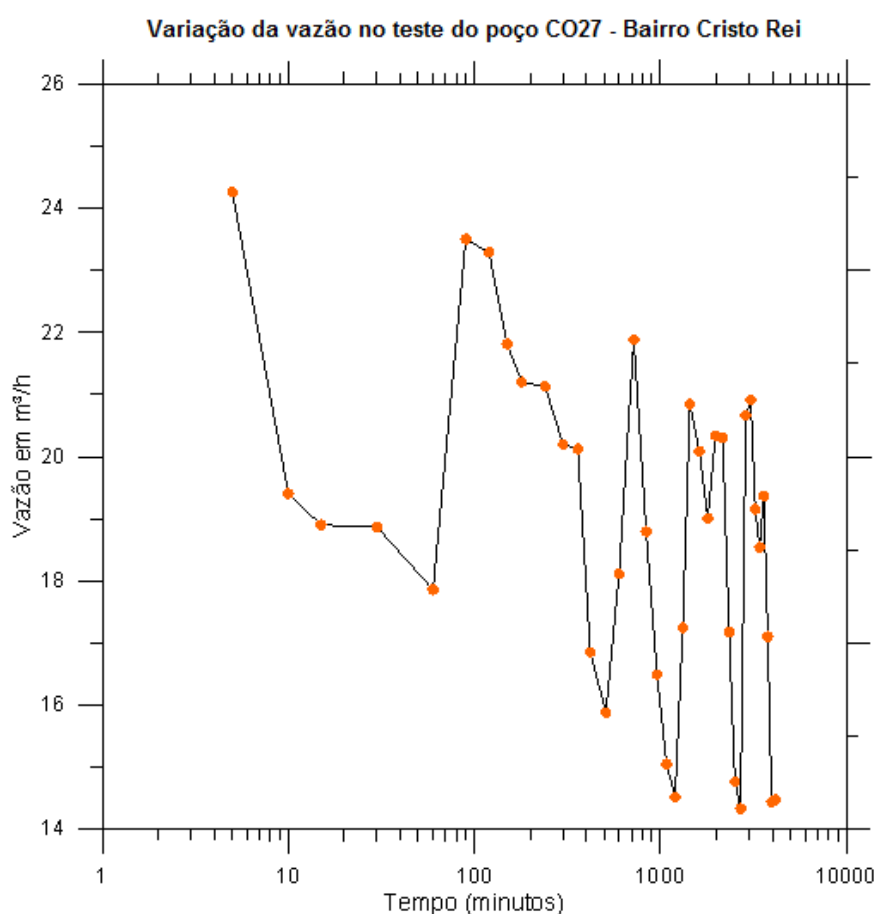


Figura 6.17: Variação da vazão bombeada com o tempo no teste do poço CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.

Por outro lado, tudo indica que as oscilações de vazão reveladas pelo gráfico da Figura 6.20 foram consequência das tentativas de manter a vazão constante controlando manualmente a abertura do registro no tubo de descarga de água.



Figura 6.18 – Água do poço CO27 jorrando espontaneamente ao nível do solo no local indicado pela seta.

Capacidade específica

A permanente variabilidade da vazão durante o teste deu origem a um rebaixamento de dimensão fractal $D=1,6993$ (Figura 6.19). Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica fractal decrescente de $22,44 \text{ m}^3/\text{h.m}$ (para 1 m de rebaixamento) a $0,38 \text{ m}^3/\text{h.m}$ para um rebaixamento de 11 m. A variação da vazão ocorreu desde o início do teste até o seu final, após 72 horas de bombeamento.

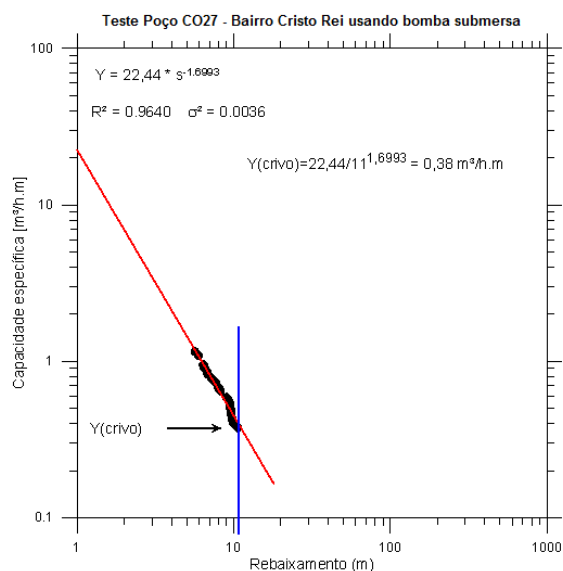


Figura 6.19: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO27 Bairro Cristo Rei em Montes Claros – MG, testado em março de 2015.

Parâmetros Hidrodinâmicos - Bairro Cristo Rei

- Poço Bombeado CO27

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO26 com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.20), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO27 no Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.

Teste	Q m³/s	t seg	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
CO27 - Cristo Rei	6,74E-03	24000	30	10	1	100	1	1,6993

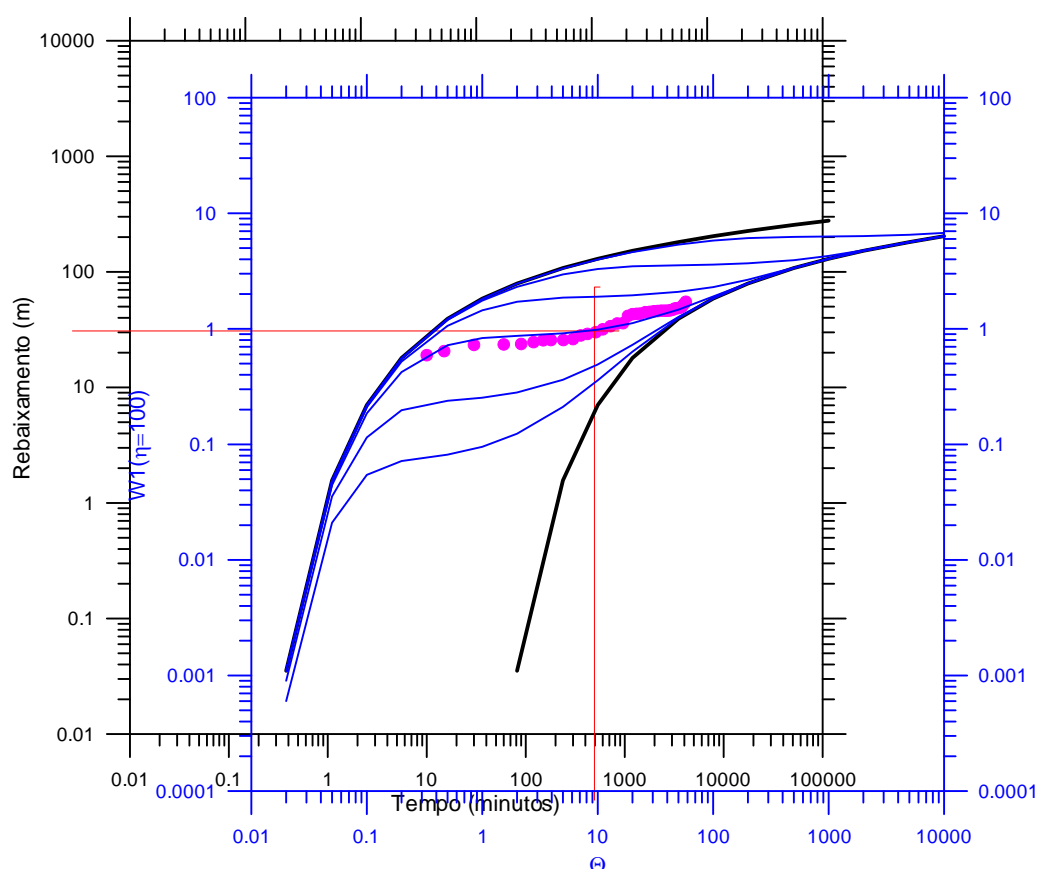


Figura 6.20 - Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO27 bombeado no Bairro Cristo Rei em Montes Claros (Modelo de Boulton 1963)

Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.

Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,79E-05	1,72E-03	0,282	6,34E-08

*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

6.3.2.3 Teste do Poço CO29 – Bairro Independência

O mapa da Figura 6.6 mostra a localização do poço CO29 testado no Bairro Independência em Montes Claros/MG. Não foram encontrados nas vizinhanças poços para observação.

A planilha desse teste pode ser vista no ANEXO 2.2.3.

O perfil litológico e construtivo do poço CO29 corresponde ao perfil apresentado na Ficha Técnica Completa do Poço 3100012526 do Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, conforme é ilustrado na Figura 6.21. Quanto à litologia a ficha técnica do poço indica uma cobertura argilosa que se estende da superfície do terreno até a profundidade de 30 m. No intervalo de 30 a 150 m (profundidade final do poço) ocorrem calcários do Grupo Bambuí que constituem um aquífero cárstico fissurado que também pode ser entendido como um condutor hidráulico, embora não tenham sido registradas as profundidades de entrada de água no poço.

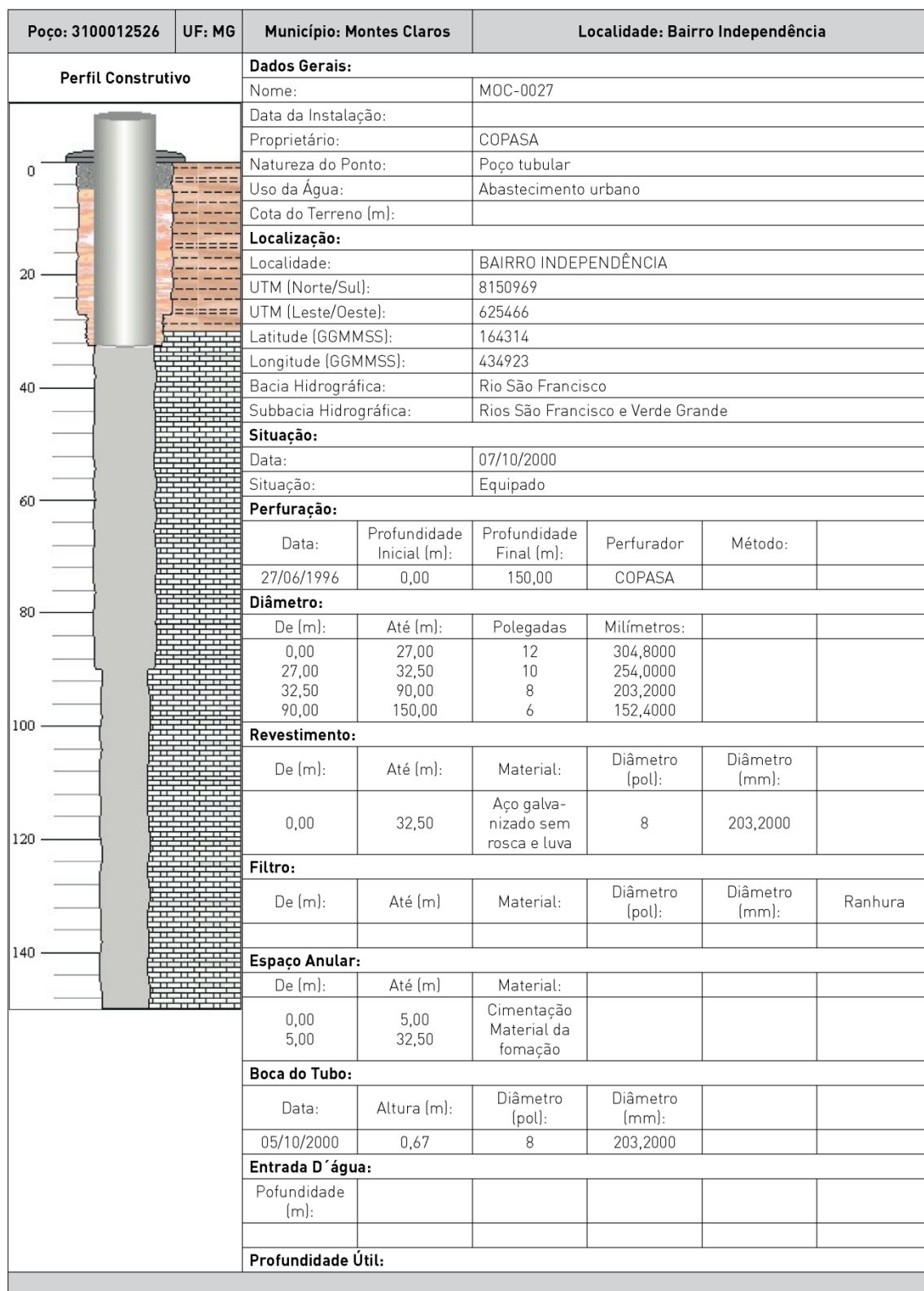


Figura 6.21: Perfil litológico e construtivo do poço CO29 Bairro Independência em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100012526). Condutor hidráulico cárstico fissural com profundidades de entradas de água não indicadas.

Capacidade específica

O teste do poço CO29 no Bairro Independência em Montes Claros/MG foi realizado com vazão constante, razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com $D=1$ (Figura 6.22). Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica decrescente de 12,06 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) a 0,52 m³/h.m com um rebaixamento de 23,11 m.

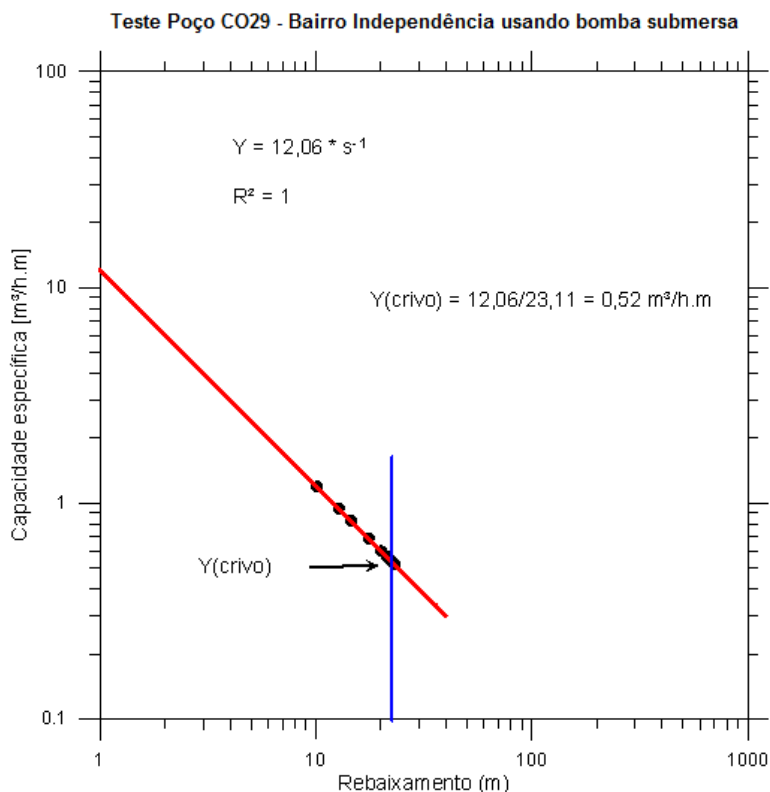


Figura 6.22: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO29 Bairro Independência em Montes Claros/MG, testado em março de 2015.

Parâmetros Hidrodinâmicos - Bairro Independência

- Poço Bombeado CO29

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO29 com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.23), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO29 no Bairro Independência em Montes Claros/MG.

Teste	Q m³/s	t seg	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
CO29-Independência	3,35E-03	3600	20	10	3,2	100	0,2	1

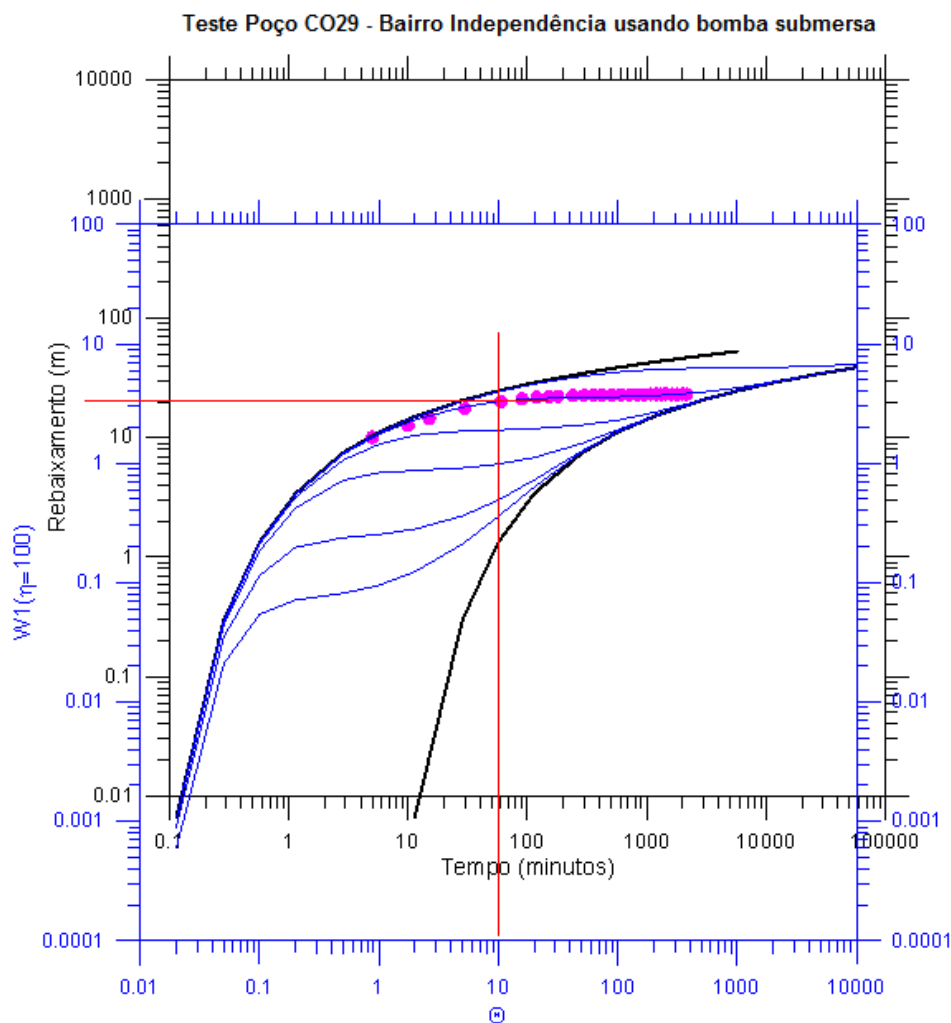


Figura 6.23: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO29 bombeado no Bairro Independência em Montes Claros pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Tabela 6.13 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço bombeado CO29 no Bairro Independência – Montes Claros/MG.

Tf m²/s	Sf	a (mm)	Kf m/s
4,27E-05	6,14E-04	0,377	1,13E-07

6.3.2.4 Teste Poço ETE COPASA

O mapa da Figura 6.6 mostra a localização do poço CO01 testado na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da COPASA em Montes Claros/MG e dos poços observados E-01 a 207 m de distância e PZ-01 a 560 m de distância.

O perfil litológico e construtivo do poço CO01 corresponde ao perfil apresentado na Ficha Técnica Completa do Poço 3100020692 do Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, conforme é ilustrado na Figura 6.24. Quanto à litologia a ficha técnica do poço indica uma cobertura argilosa que se estende da superfície do terreno até a profundidade de 12 m. No intervalo de 12 a 150 m (profundidade final do poço) ocorrem calcários do Grupo Bambuí que constituem um aquífero cárstico fissurado que também pode ser entendido como um condutor hidráulico, com entradas de água nas profundidades de 16, 27,5, 74 e 126 m.

A planilha do teste de bombeamento realizado no Poço CO01 – ETE COPASA encontra-se no ANEXO 2.2.4.

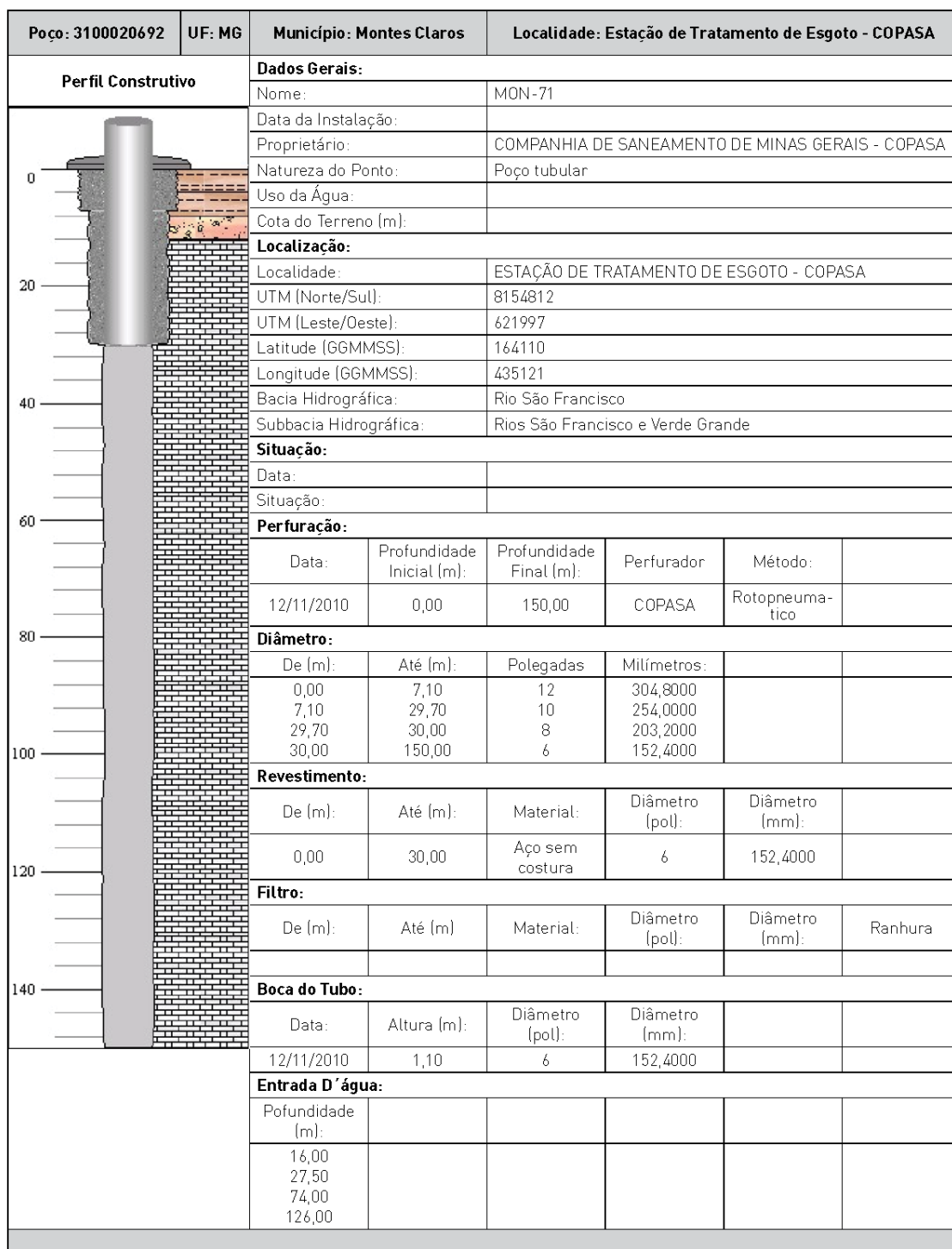


Figura 6.24: Perfil litológico e construtivo do poço CO01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG (SIAGAS 3100020692). Condutor hidráulico cárstico fissural com profundidades de entradas de água a 16, 27,5, 74 e 126 m.

Capacidade específica

O teste do poço CO01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG foi realizado com vazão constante, razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com $D=1$ (Figura 6.25). Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica de 20,16 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) decrescente para 2,59 m³/h.m com um rebaixamento de 7,77 m.

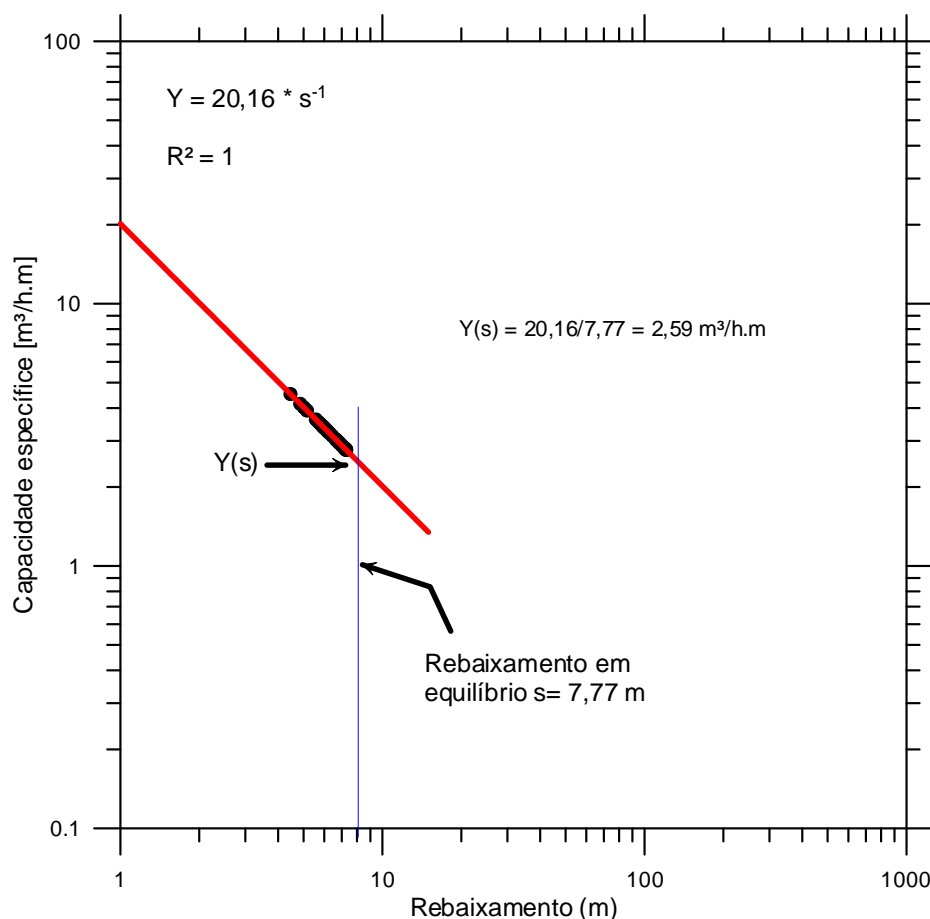


Figura 6.25: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO01 ETE COPASA em Montes Claros/MG, testado em março de 2015.

* Vazão constante produzindo um rebaixamento de dimensão inteira $D=1$, associado a uma vazão constante equivalente de 20,16 m³/h ou 5,5 L/s, em equilíbrio por recarga induzida do Riacho do Vieira

Parâmetros Hidrodinâmicos – ETE COPASA

- Poço Bombeado CO01

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado CO29 com a curva da função de Boultou para meio fraturado (Figura 6.26), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado CO01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
CO01 ETE COPASA	5,5E-03	19200	5,6	10	2,0	1000	0,5	1

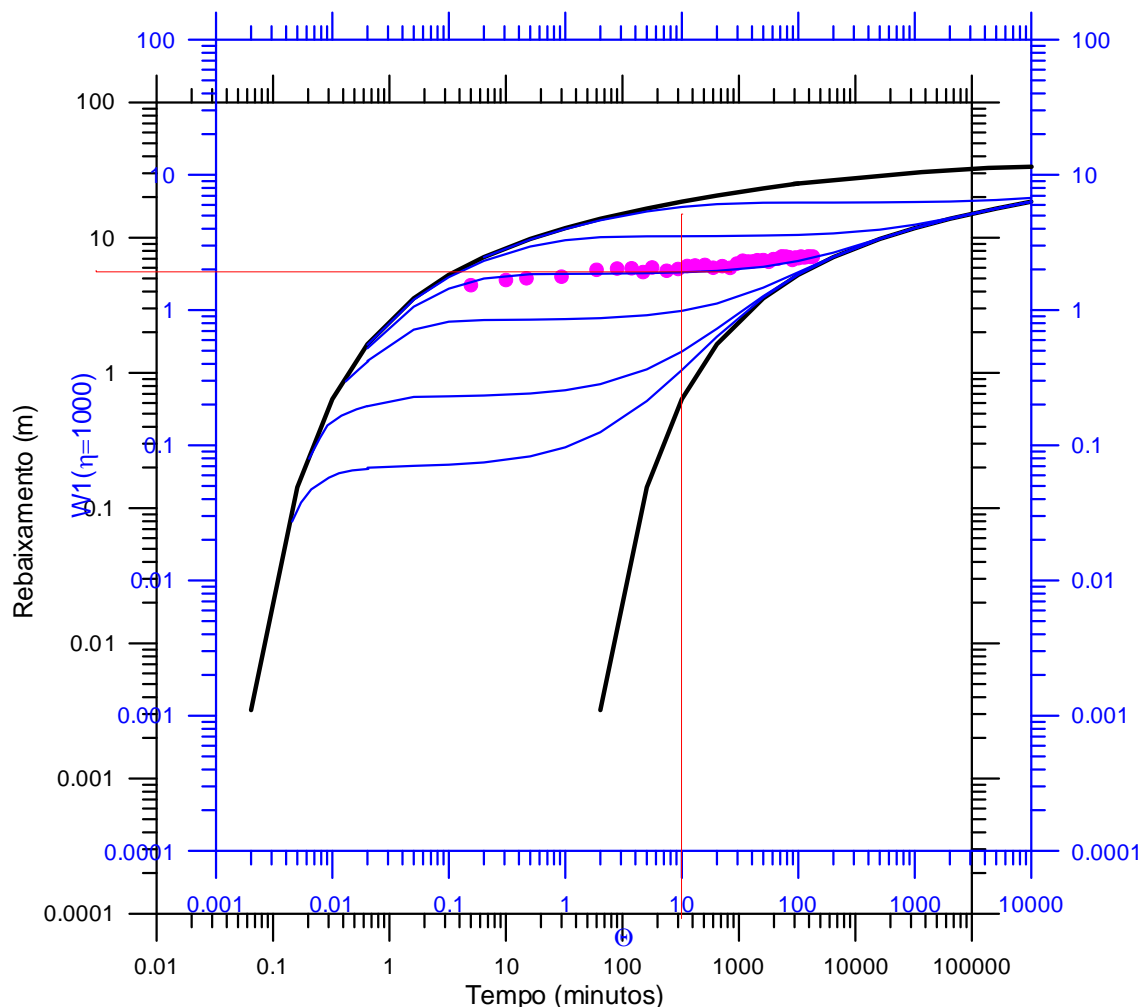


Figura 6.26: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço CO01 bombeado na ETE COPASA em Montes Claros pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Tabela 6.15 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de bombeamento do poço CO01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG.

Tf m²/s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,56E-04	1,20E-02	0,5804	2,69E-07

*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

Parâmetros Hidrodinâmicos – ETE -01

- Poço Observado em Bombeamento

Esse poço foi observado em seu regime normal de funcionamento, já que não foi possível interromper o abastecimento de água da ETE. A sua curva de rebaixamento se afigura em regime de equilíbrio e mostrando claramente as oscilações produzidas pelo seu regime de funcionamento, com suas paradas e retomadas. A superposição da curva de rebaixamento obtida nesse poço com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.27), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.16. A eventual interferência foi mascarada pelo bombeamento e não pode ser determinada.

Tabela 6.16 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado e bombeando E-01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
E-01 Obs-Bombeando	5,50E-03	51000	5,6	10	2	1000	0,5	1

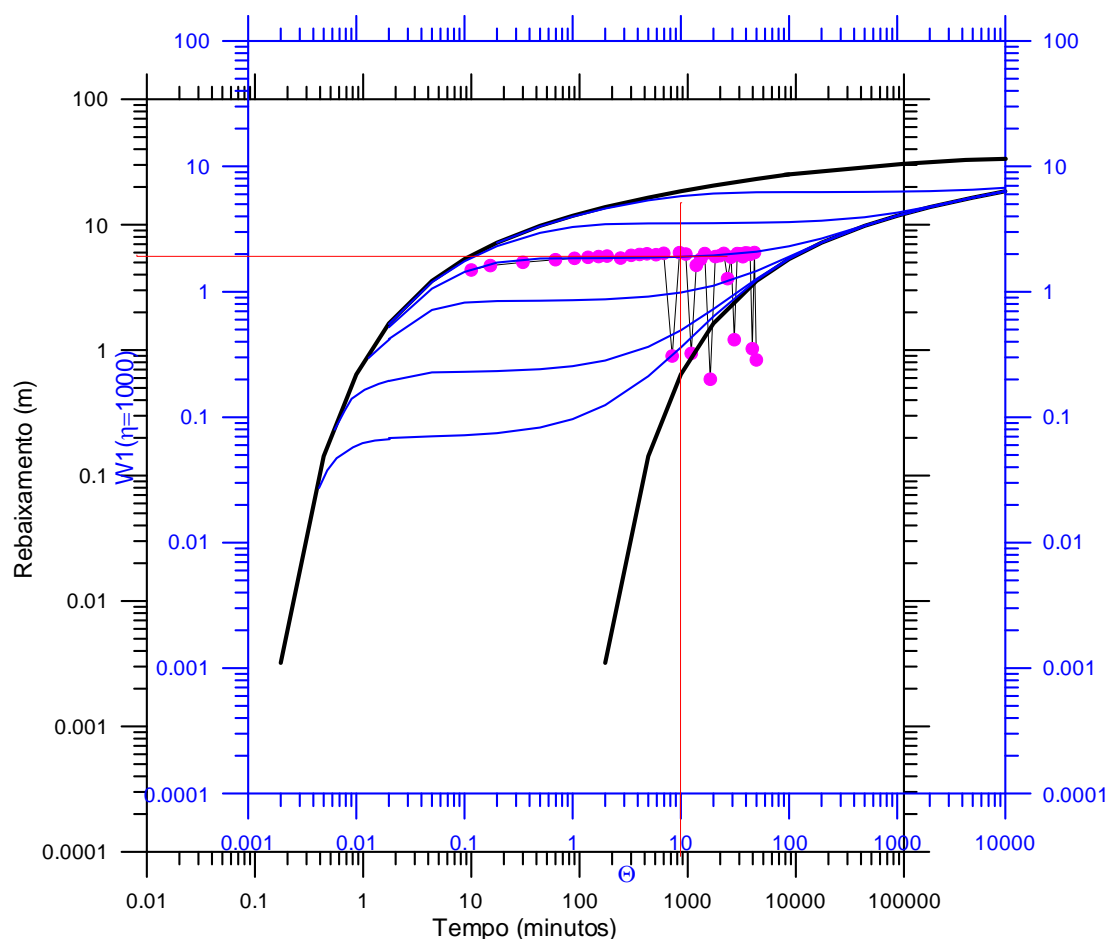


Figura 6.27: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço E-01 ETE COPASA em Montes Claros, observado em bombeamento simultâneo com o C01 a 207m de distância, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Tabela 6.17 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado bombeando E-01 da ETE COPASA em Montes Claros/MG.

Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf (m/s)
1,56E-04	1,20E-02	0,5804	2,69E-07

- Poço Observado PZ-01

A superposição da curva de rebaixamento obtida no poço observado PZ-01 durante o teste de bombeamento do poço CO01, situado a 560 m de distância na ETE COPASA com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.28), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PZ-01 na ETE COPASA em Montes Claros/MG.

Teste	Q m ³ /s	t seg	s (m)	Θ	WΘ	η	r/B	D
PZ-01 Obs	5,50E-03	36000	0,075	36	1	10	2	1

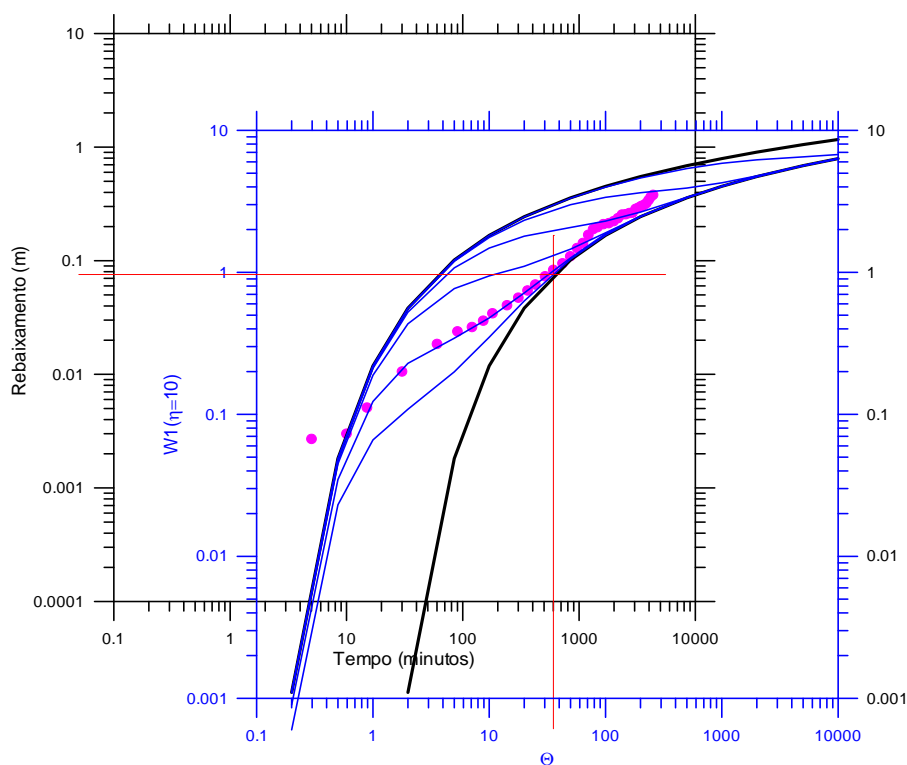


Figura 6.28: Avaliação dos parâmetros hidráulicos no poço PZ-01 na ETE COPASA em Montes Claros, observado em bombeamento a 560 m de distância, do poço bombeado CO01 pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Tabela 6.19 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço PZ-01 da ETE COPASA, a 560 m de distância do bombeado em Montes Claros/MG.

Tf (m ² /s)	Sf	a (mm)	Kf (m/s)
5,84E-03	7,44E-05	1,938	3,01E-06

6.3.2.5 Teste do Poço C32 – Rebentão dos Ferros

O mapa da Figura 6.6 mostra a localização do poço CO32 testado na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros. O perfil litológico e construtivo do poço CO32 corresponde ao perfil apresentado na Ficha Técnica Completa do Poço 3100012513 do Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, conforme é ilustrado na Figura 6.29.

Quanto à litologia a ficha técnica do poço indica uma cobertura argilosa que se estende da superfície do terreno até a profundidade de 12 m. No intervalo de 12 a 150 m (profundidade final do poço) ocorrem calcários do Grupo Bambuí que constituem um aquífero cárstico fissurado que também pode ser entendido como um condutor hidráulico, com entradas de água nas profundidades de 34, 43, 44 e 49 m. A planilha do teste está no ANEXO 2.2.5.

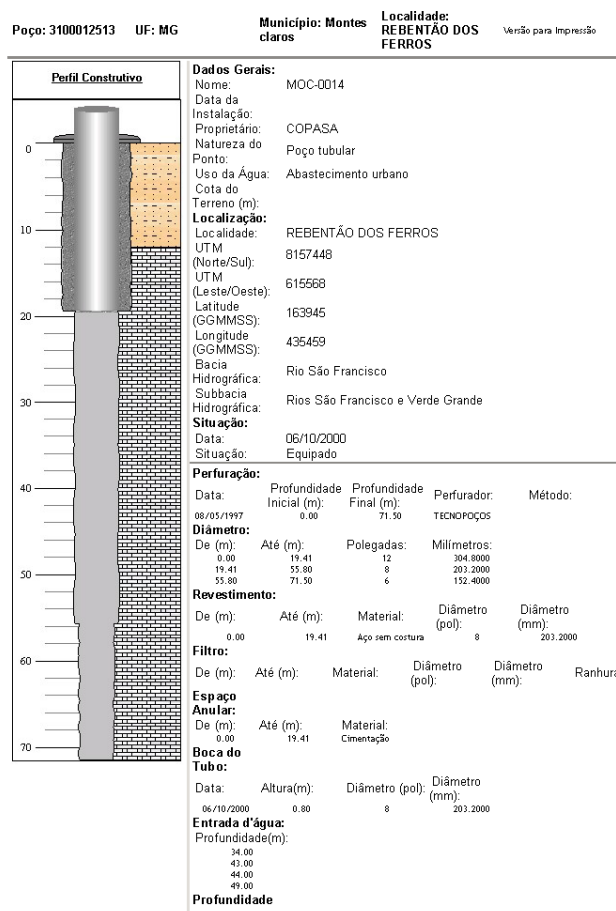


Figura 6.29: Perfil litológico e construtivo do poço CO32 bombeado no teste realizado em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros.

Teste CO32 - setembro de 1998

- Capacidade específica

O teste do poço CO32 na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros Montes Claros/MG foi realizado com vazão pouco variável decrescente de 65 L/s (234 m³/h) para 62 L/s (223,2 m³/h), razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão fractal muito próximo da unidade, ou seja, $D=1,0054$ (Figura 6.30). Tem-se, portanto, neste caso, uma capacidade específica de 232,8 m³/h.m (para 1 m de rebaixamento) decrescente para 10,11 m³/h.m com um rebaixamento de 22,64 m.

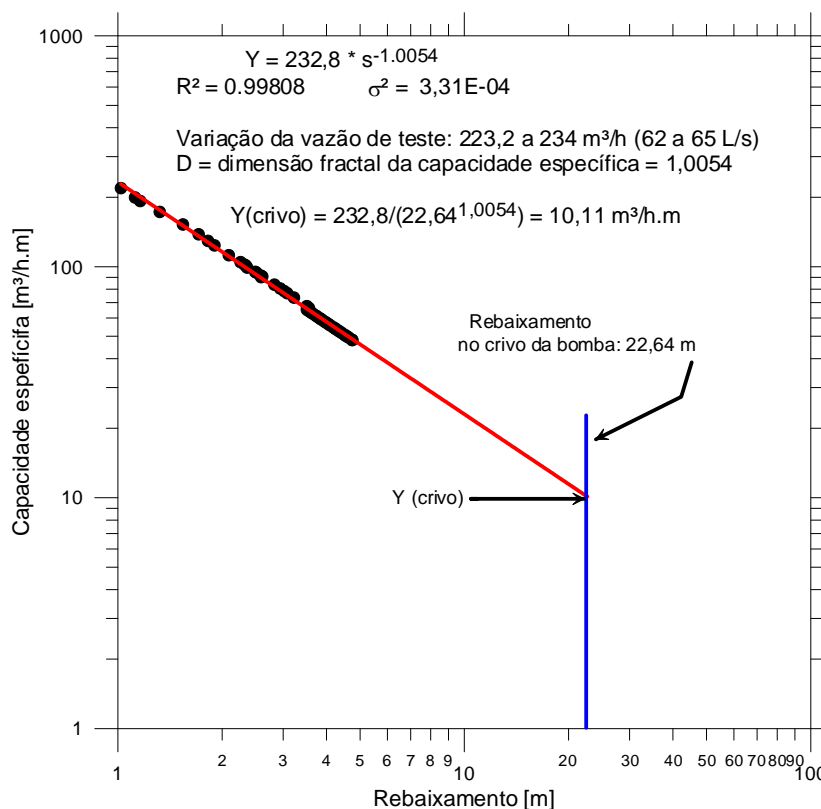


Figura 6.30: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros Montes Claros/MG, testado em setembro de 1998.

- Parâmetros Hidrodinâmicos do CO32 – setembro 1998

A superposição da curva de rebaixamento obtida no poço bombeado CO32 durante o teste bombeamento em Rebentão dos Ferros com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.31), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.20.

Tabela 6.20 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço CO32 bombeado no teste de Rebentão dos Ferros captação da COPASA a 11 km de Montes Claros/MG.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	W Θ	η	r/B	D
Rebentão dos Ferros CO32_set98	6,47E-02	1860	0,9	10	0,95	100	1	1,0054

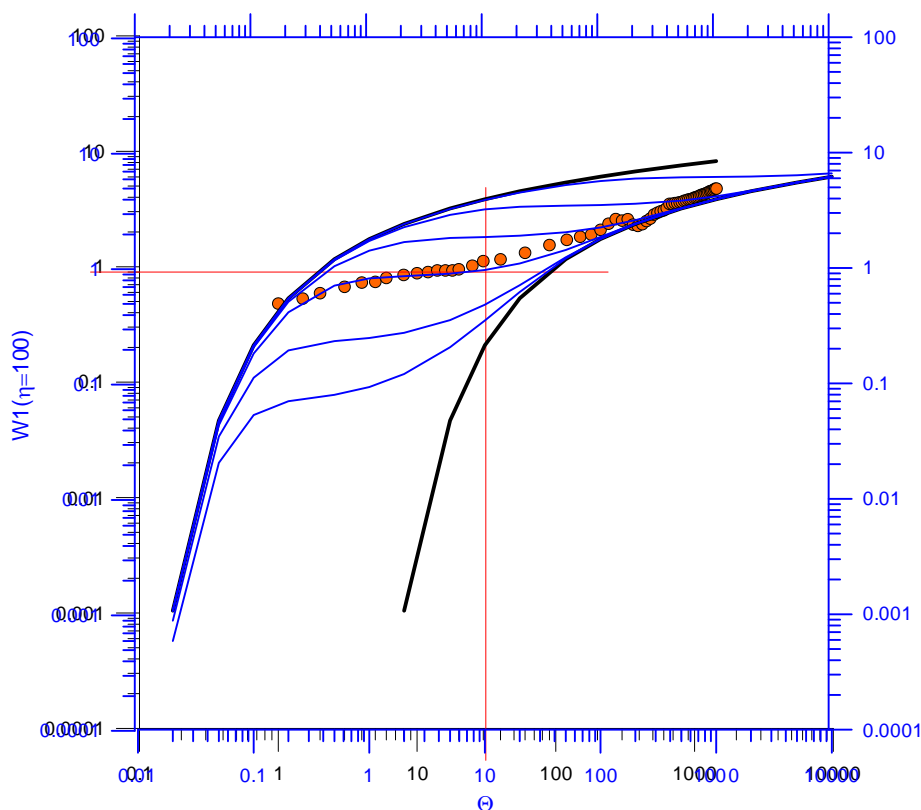


Figura 6.31: Avaliação dos parâmetros hidráulicos do teste de setembro de 1998 no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Tabela 6.21 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço CO32 bombeado em setembro de 1998 na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de distância Montes Claros/MG.

Tf m²/s	Sf	a (mm)	Kf m/s
5,43E-03	4,04E-02	1,892	2,87E-06

Teste CO32 – março de 2015

- Vazão do teste

Apesar de ter sido realizado com a utilização de bomba submersa o teste do poço CO32 na captação de Rebentão dos Ferros em Montes Claros foi realizado com dois escalões de vazão sendo no primeiro em torno de 40 m³/h e no segundo, em torno de 106 m³/h Figura 6.32. Em ambos a vazão oscilou bastante. Isto aconteceu em decorrência de variações de corrente elétrica já que o sistema funcionou automaticamente com a bomba operada em seu regime normal pela COPASA, interligada diretamente na rede de abastecimento público.

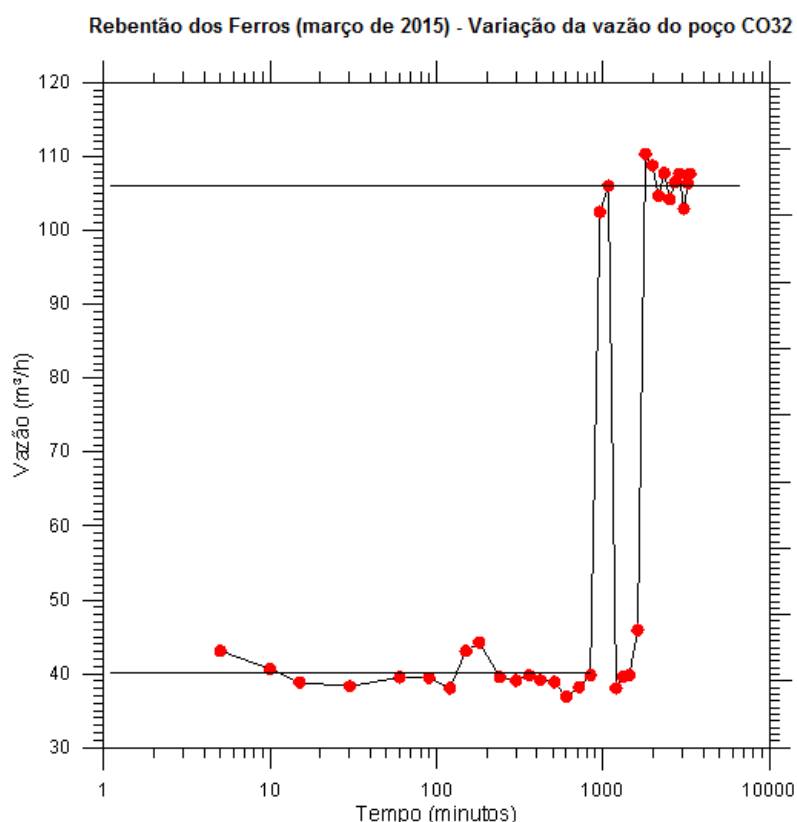


Figura 6.32: Variação da vazão bombeada com o tempo no teste do poço CO27 – Bairro Cristo Rei em Montes Claros/MG.

- Capacidade específica

O teste do poço CO32 na captação de Rebentão dos Ferros, a 11 km de Montes Claros/MG foi realizado com dois escalões de vazão ligeiramente variável. No primeiro, com cerca de 40 m³/h e rebaixamento sempre inferior a 1 m, cresceu e decresceu encerrando com uma dimensão fractal inferior à unidade, ou seja, $D=0,9959$ e no segundo escalão aproximado de 106 m³/h apresentou uma tendência decrescente com dimensão fractal $D = 1,0259$ (Figura 6.33). Isto significa que em cada escalão a vazão variou pouco, apresentando, porém, tendência de crescimento no primeiro ($D = 0,9959 < 1$) e tendência de queda no segundo ($D=1,0259 > 1$). Esse comportamento revela capacidades específicas variáveis de 70 a 600 m³/h.m indicativas da existência

de uma zona muito carstificada no condutor hidráulico ou mesmo de ligação desse condutor com águas superficiais

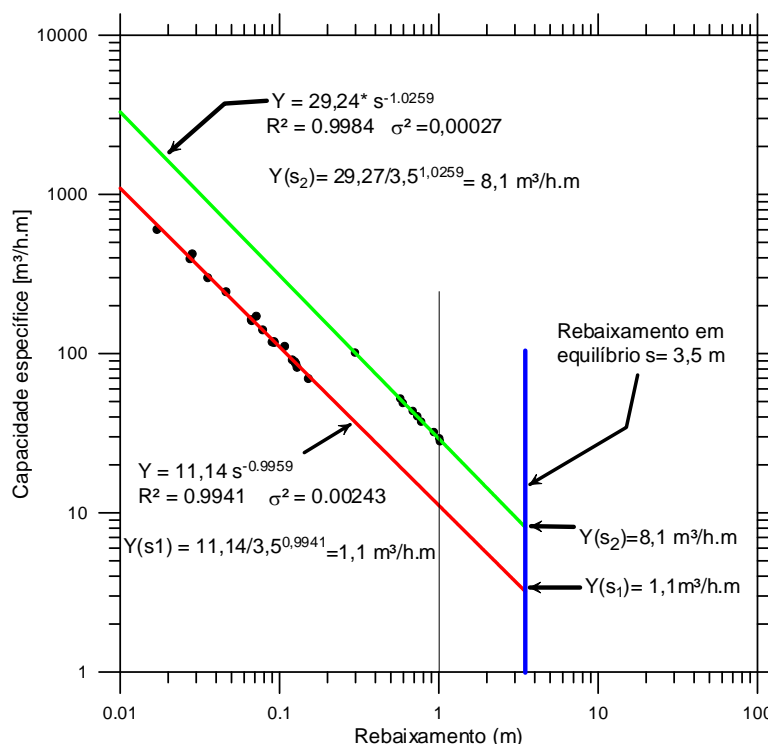


Figura 6.33: Capacidade específica versus rebaixamento no poço CO32 na captação de Rebentão dos Ferros da COPASA em Montes Claros – MG, testado em março de 2015.

- Parâmetros Hidrodinâmicos do poço CO32 – março de 2015

A superposição da curva de rebaixamento obtida no poço bombeado CO32 com a curva da função de Boultou para meio fraturado foi feita apenas para os pontos obtidos durante os instantes iniciais do teste nos quais o rebaixamento manteve uma tendência de crescimento (Figura 6.34). Isso permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 – Parâmetros da função de Boultou obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço CO32 bombeado no teste de Rebentão dos Ferros captação da COPASA a 11 km de Montes Claros/MG.

Teste	Q (m³/s)	t (seg)	s (m)	Θ	WΘ	η	r/B	D
Rebentão dos Ferros 32 _mar15	3,09E-03	6000	0,13	4,3	2,8	100	0,2	0,9941

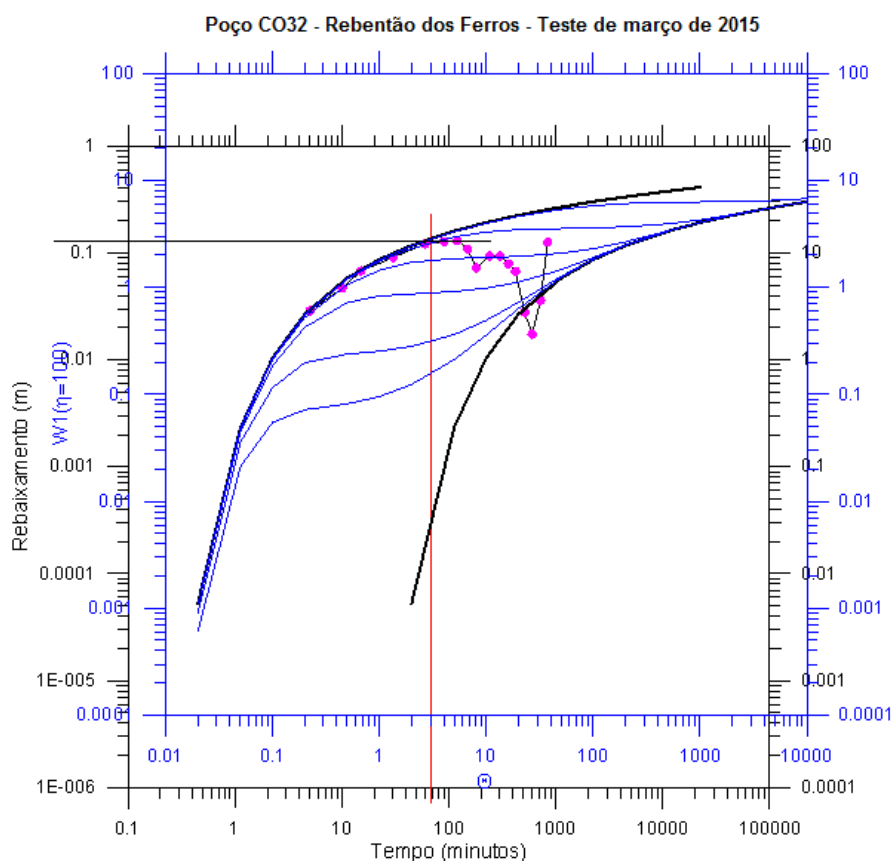


Figura 6.34: Avaliação dos parâmetros hidráulicos do teste de março de 2015 no poço CO32 da captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de Montes Claros, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.

Notar que a significativa alteração da vazão produziu um brusco desvio da curva de campo em relação à curva da função de Boulton.

Tabela 6.23 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço CO32 bombeado em setembro de 1998 na captação da COPASA em Rebentão dos Ferros a 11 km de distância Montes Claros/MG.

Tf m ² /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
5,43E-03	4,04E-02	1,892	2,87E-06

6.3.2.6 Síntese dos parâmetros hidráulicos da área piloto da Bacia do Rio do Vieira

Os parâmetros hidrodinâmicos dos condutores hidráulicos analisados no Sistema Aquífero Bambuí (SAB) na área de Montes Claros/MG estão resumidos na Tabela 6.24 e são analisados como segue:

No que se refere ao armazenamento nas fraturas, o parâmetro S_f revela forte heterogeneidade do meio cárstico – fraturado pois indica uma variação da ordem de 4.000 vezes ($0,01 \times 10^{-2} \leq S_f \leq 24,4 \times 10^{-2}$), consistente com a realidade. A condutividade hidráulica nas fraturas é muito baixa (média de 0,07

m/dia), porém consistente com valores encontrados na literatura, assim como a abertura média nas fraturas que é de apenas 0,82 mm.

Tabela 6.24 – Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Bambuí (SAB) obtidos em 13 testes de bombeamento, sendo cinco realizados em março de 2015 no âmbito do projeto na área de Montes Claros/MG.

Teste	Poço	Tf (m ² /s)	Sf	a (mm)	Kf (m/s)	Kf (m/dia)	D
Julho 1996 Almojarifado	CO26	1,63E-4	6,26E-5	0,59	2,77E-7	0,024	1
Julho 1996 Almojarifado B	CO26	1,61E-4	7,72E-4	0,59	2,74E-7	0,024	1,6582
Almojarifado novembro 2004	CO26	9,41E-5	2,71E-2	0,49	1,92E-7	0,017	1,8616
Almojarifado março de 2014	CO26	8,95E-5	8,59E-4	0,48	1,86E-7	0,016	1
Almojarifado março de 2014 C	CO26	8,43E-5	2,02E-3	0,47	1,78E-7	0,015	1,6249
Almojarifado março de 2015	CO26	8,63E-5	4,14E-2	0,48	1,81E-7	0,016	1,0191
Bairro Cristo Rei - março 2015	CO27	1,79E-5	1,72E-3	0,28	6,34E-8	0,005	1,6993
Bairro Independência março 2015	CO29	4,27E-5	6,14E-4	0,38	1,13E-7	0,010	1
ETE COPASA março 2015	CO01	1,56E-4	1,20E-2	0,58	2,69E-7	0,023	1
ETECOPASA Obs-Bombeando 2015	E01	1,56E-4	3,19E-2	0,58	2,69E-7	0,023	1
ETE COPASA Obs março 2015	PZ01	5,84E-3	7,44E-5	1,94	3,01E-6	0,260	1
Rebentão dos Ferros setembro 1998	CO32	5,43E-3	4,04E-2	1,89	2,87E-6	0,248	1,0054
Rebentão dos Ferros março 2015	CO32	5,30E-3	2,44E-1	1,88	2,82E-6	0,244	0,9941
Médias		1,36E-3	3,10E-2	0,82	8,24E-7	0,07	

De modo geral os testes foram realizados em condições adversas, com os poços sempre em exploração e sofrendo influências mútuas algumas vezes com extrema variação de vazão em virtude de oscilações de energia. Um caso extremo ocorreu no poço CO32 de Rebentão dos Ferros onde foram observadas variações de corrente elétrica no sistema interligado diretamente na rede de abastecimento público. Nesse caso (Figura 6.39), somente o trecho inicial da curva de rebaixamento foi usado para avaliar os parâmetros hidrodinâmicos. Mesmo assim os resultados são satisfatórios, com valores dentro do esperado.

6.4 Recargas e exutórios

O cômputo das recargas médias anuais que ocorrem na Área Piloto do rio Vieira está calcado, inicialmente, na avaliação dos hidrogramas médios anuais representativos das estações fluviométricas Colônia do Jaíba (44670000), com uma superfície de contribuição de 12.000 km².

Essa área piloto conforma uma das cabeceiras de drenagem do Rio Verde Grande, perfazendo cerca de 4,8% do total da sub-bacia hidrográfica delimitada pela seção fluviométrica de Colônia do Jaíba.

Considerando-se o cenário hidrogeológico e a disponibilidade de estações fluviométricas com mais de 30 anos de medições como premissa para seleção de estações favoráveis aos cálculos dos volumes de contribuição subterrânea, fez-se necessário incluir as estações de Claro dos Poções e Ponte dos Ciganos, com vistas à melhor aproximação dos valores de calibração necessários ao cômputo das recargas, conforme a presença de materiais geológicos similares na vizinhança. A Figura 6.35 a seguir mostra o posicionamento desta área piloto no contexto geológico regional.

As estimativas de deflúvios médios para essas estações apontam valores passíveis de comparação aos escoados na área piloto, em vista da presença de litologias similares existentes na bacia, quais sejam: predominância das rochas da Formação Lagoa do Jacaré.

Desse modo, em vista do posicionamento das estações de interesse, torna-se necessário avaliar os exutórios e as recargas correspondentes ao domínio global de abrangência de todo o sistema hidrológico em questão, conformado pelas áreas de contribuição de cada uma das estações citadas.

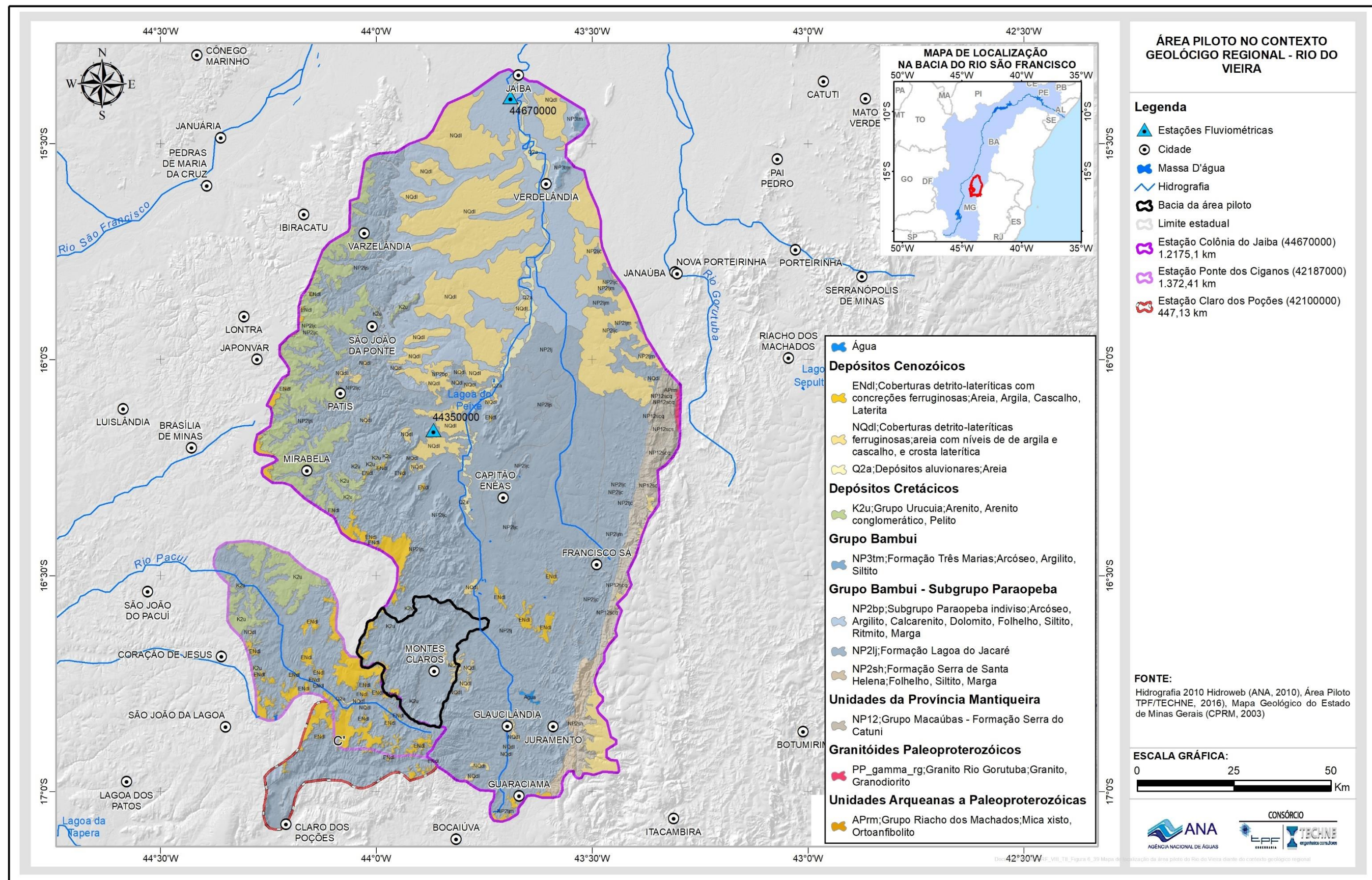


Figura 6.35: Mapa de localização da área piloto do Rio do Vieira diante do contexto geológico regional.

Conforme mostra o mapa da Figura 6.35, 64% dos tipos de rocha mapeados em superfície no domínio das bacias delimitadas pelas estações fluviométricas avaliadas, são rochas carbonáticas, sendo 51,7% pertinentes à Formação Lagoa do Jacaré e os 12,3% restantes ao Subgrupo Paraopeba. As demais unidades geológicas presentes na área são: Coberturas detrítico-lateríticas (18,7%), rochas sedimentares do Grupo Urucuia (7,1%), rochas sedimentares não carbonáticas das formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Três Marias (6,3%), rochas metassedimentares do Grupo Macaúbas (2,6%), Depósitos Aluvionares (1,2%) e granitoides paleoproterozoicos (0,1%).

A Tabela 6.25 apresenta os dados básicos dos postos fluviométricos utilizados para os cálculos de recarga, incluindo código e localização da estação, área da bacia e o período dos registros de medições de descarga em cada uma delas.

Tabela 6.25 – Informações básicas sobre as estações fluviométrica utilizada no cálculo de recarga da área piloto do Rio do Vieira.

Código*	Latitude	Longitude	Local	Rio	Área (Km ²)	Monitoramento	Período do cálculo
42100000	-70.911	-442.414	Claro dos Poções	Rio São Lamberto	447,00	1973 - 2010	1973 - 2004
42187000	-64.669	-443.761	Ponte dos Ciganos	Rio Pacuí	1.372,00	1973 - 2015	1973 - 2007
44670000	-53.431	-436.756	Colônia do Jaíba	Rio Verde Grande	12.175,00	1962 - 2015	1962 - 2007

6.4.1 Considerações hidrogeológicas e hidrológicas

A área piloto do Rio do Vieira situa-se na porção montante da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande, a qual drena uma extensa área até sua confluência com o Rio São Francisco. A demografia da Bacia do Verde Grande é fortemente influenciada pela presença da cidade de Montes Claros, principal polo regional, onde reside mais de 1/3 da população da bacia.

Recentes investigações ao longo da região abrangendo algumas áreas vizinhas às sedes municipais do interior da Bacia do Rio Verde Grande denotam um processo de alteração das condições de circulação hídrica superficial e subterrânea. Relatos e averiguações em campo mostram a ocorrência de uso descontrolado das águas, seja pelo desconhecimento da implantação de barragens e das vazões bombeadas no próprio Rio Verde Grande, seja pelo número de usuários e de poços tubulares profundos.

A Bacia do Verde Grande possui grande variabilidade espacial das chuvas. O total anual médio precipitado é da ordem de 785 mm, sendo que os mais altos índices se concentram nas cabeceiras da bacia (área piloto), atingindo valores anuais superiores a 1.300mm. Esses índices vão diminuindo gradualmente em direção ao centro da bacia e em parte de sua porção norte, até atingir valores

inferiores a 700 mm. Na área piloto é assumida uma média anual em torno de 1100 mm, conforme mostra o mapa de distribuição das isoietas da Figura 6.36.

A distribuição da chuva regional revela a nítida existência de estações bem marcadas, seca e úmida. A análise da ocorrência de chuvas em anos diferentes mostra que em cerca de 20% dos anos, identificados como os mais secos, a chuva na bacia é inferior a 70% da chuva anual média, enquanto que no outro extremo, em 20% dos anos identificados como os mais úmidos, a chuva é superior a 130% da chuva anual média. Este fato comprova a elevada variabilidade do regime de chuvas, o que reflete no potencial hídrico dos mananciais superficiais e subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Verde Grande, conforme apresentado no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande (ANA, 2013)

A exemplo de outros ambientes, muitas são as implicações derivadas das diferenças que ocorrem entre os limites físicos das bacias hidrográficas e os respectivos divisores hidrogeológicos subterrâneos. Na própria área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira em Montes Claros, a partir dos estudos de aplicação das técnicas de traçadores corantes, puderam-se constatar cabalmente essas assertivas, tendo sido verificada a conexão hidráulica subterrânea entre pontos situados entre as duas margens do Rio do Vieira.

Nesse sentido, os resultados apresentados no estudo da bacia do Rio Riachão (Proágua/IGAM, 2001), bacia contígua à área piloto do Vieira, constituem um excelente exemplo das características hidrogeológicas do ambiente cárstico local. Estes estudos foram consubstanciados por análises físico-químicas e isotópicas, e por interpretações geológico-estruturais as quais permitiram tecer algumas considerações importantes, quais sejam:

- As águas amostradas em pontos representativos do sistema aquífero cárstico na região do alto curso do Rio Riachão, sejam aqueles localizados em área de descarga natural formadora da Lagoa Tiririca, sejam aqueles situados em sua margem oriental, como na faixa limítrofe com a sub-bacia contígua do Rio Verde Grande, como também em pontos de surgência natural (fonte) com vazões significativas que ocorrem no sopé do *front* de calcário da serra de Santa Rosa de Lima, apresentam baixo conteúdo de Trítio (^3H) (Proágua/IGAM, 2001), característica que lhes confere tempos de trânsito relativamente elevados, correspondentes a águas antigas, sob fluxo regional de direção e sentido SW-NE. Ou seja, parte dos volumes escoados nesse setor podem estar sendo recarregados na área piloto;
- Os resultados de conteúdo em Trítio (Proágua/IGAM, 2001) das águas apresentam compatibilidade com a dinâmica de circulação regional e respectiva distribuição geográfica entre estes pontos amostrais representativos do sistema aquífero cárstico em pauta, em função das estimativas de quantificação relativa dos tempos de trânsito, segundo o modelo de Mistura Completa das águas subterrâneas.

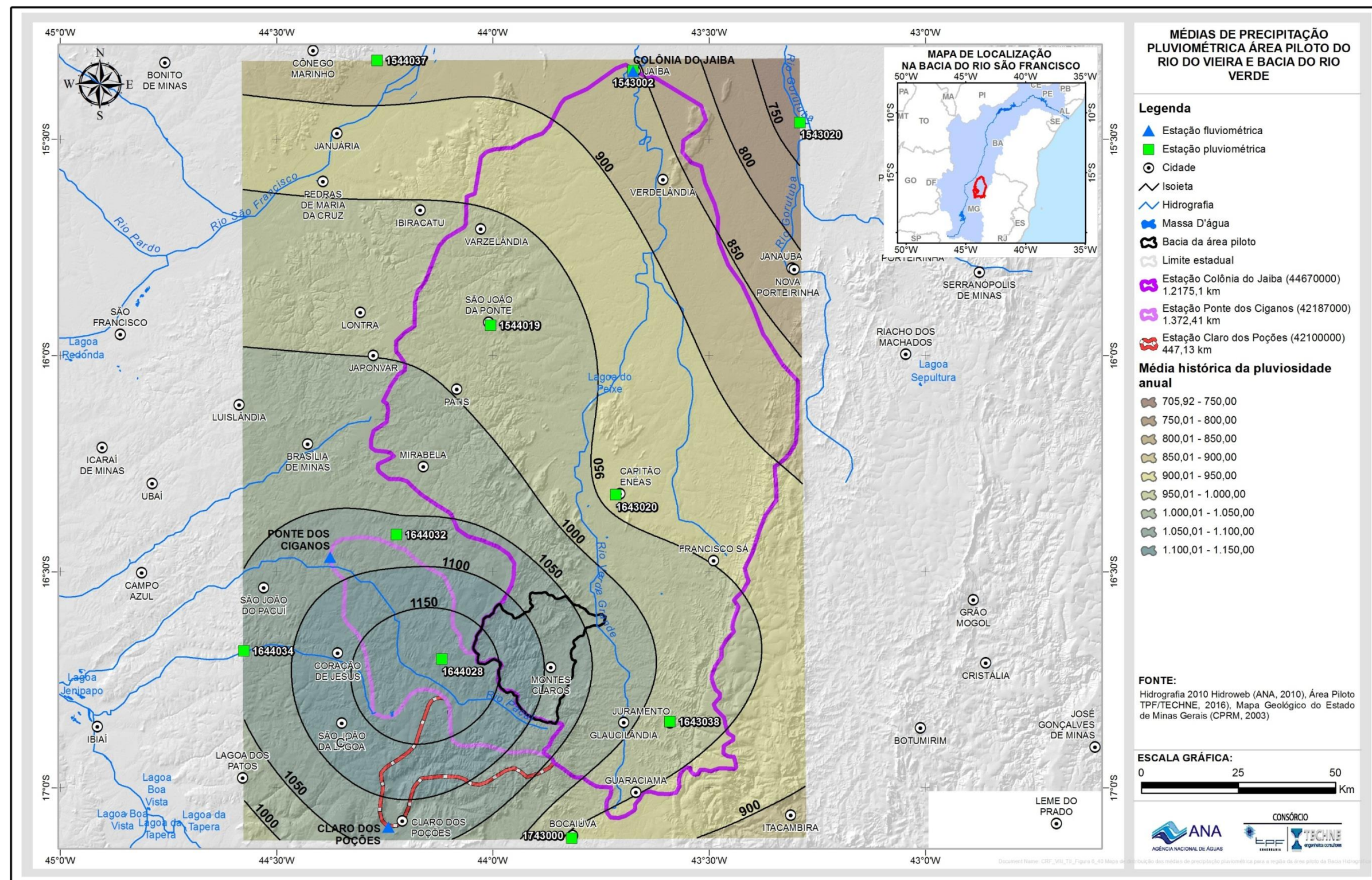


Figura 6.36: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira e da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande

- O escoamento regional se dá, preferentemente, ao longo de planos de descontinuidades e dissolução química de carbonatos, associados ao acamamento da rocha calcária, bem como ao longo de descontinuidades de fratura e carstificação, em especial sob a direção NW – descontinuidades hidráulicas interconectadas, sob diferentes profundidades, tendo sido identificados níveis de carstificação entre 790-795m e 770m; entre 740m e 755m e entre 695m e 630m.
- Os níveis de carstificação mais profundos (cotas mais baixas) foram melhor observados nas citadas restituições naturais – fontes pontuais com vazões significativas – existentes nos contrafortes do *front* de calcário da serra de Santa Rosa de Lima, na faixa oriental da área de estudo, já no âmbito da sub-bacia hidrográfica do Rio Verde Grande. A ocorrência destas descargas subterrâneas naturais, de natureza e características químicas e isotópicas similares aos pontos amostrais localizados a fluxo montante, aliada às características geológico-estruturais e geomorfológicas da região em pauta, configura, pois, a coexistência de fluxos subterrâneos regionais sob escoamento SW-NE, e consequente intercomunicação hidráulica subterrânea entre as sub-bacias hidrográficas do Rio Riachão e rio Verde Grande.

Em termos de sua dinâmica hídrica de subsuperfície, o sistema hidrogeológico da região de Montes Claros deve ser regulado pela recarga oriunda das faixas de maior altitude, que correspondem aos terrenos de morfologia plana a aplainada de cobertura detrítica terciário-quadernária, areno-siltosa a areno-siltico-argilosa, de ocorrência às vezes contínua, como aquelas que se estendem no percurso entre a região do alto Rio Riachão, cabeceiras da sub-bacia hidrográfica contígua do Rio Verde Grande, em sua porção ocidental (PROÁGUA/IGAM, 2001) e, também, ao sul, como a que separa o domínio da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio Vieira à calha de drenagem do Rio Pacuí (Figura 6.37). Como apresentado na referida figura, nota-se em todos os casos, que o limite topográfico que marca o contorno da área piloto situa-se muito próximo das referidas calhas de drenagem.

O fluxo subterrâneo regional associado ao sistema aquífero cárstico subjacente a estas coberturas detríticas, se processa preferentemente ao longo do acamamento das rochas carbonáticas a pelítico-carbonáticas, sob direção e sentido NE (nordeste). Descontinuidades associadas às fraturas sob a direção NW (noroeste) são também relevantes para o fluxo subterrâneo, não raras vezes estão atreladas às feições morfoestruturais cársticas, possibilitando a formação de dolinas alinhadas sob esta direção de escoamento (PROÁGUA/IGAM, 2001)

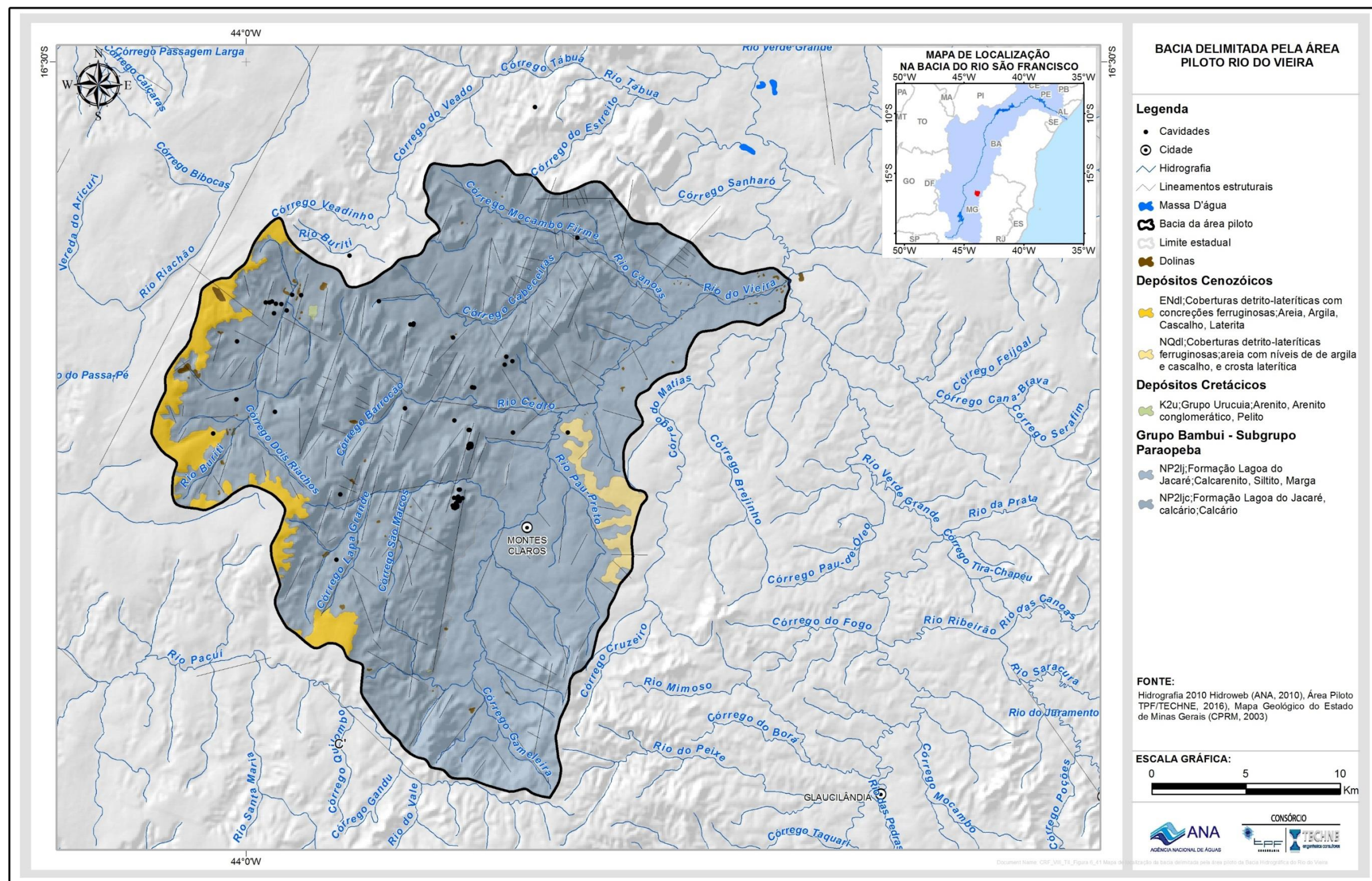


Figura 6.37: Mapa de localização da bacia delimitada pela área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Embora seja importante ressaltar tais aspectos, a escala regional de abordagem dos estudos permite admitir que a margem de erro dos próprios recursos metodológicos empregados nos cálculos hidrológicos para quantificação dos exutórios (preenchimento de lacunas de séries hidrológicas, consistência de dados, análises estatísticas, etc.) se equivale às diferenças existentes quanto aos limites reais das bacias hidrológicas / hidrogeológicas, sobretudo quando considerada a presença de relevos cársticos, cuja geometria pode implicar em variações espaço-temporais desses limites. Ou seja, os aquíferos são flutuantes em termos de sua abrangência física no espaço do ambiente cárstico, podendo na estiagem se restringir a áreas menores e, no período úmido, os contornos hidrogeológicos alcançarem grandes proporções.

6.4.2 Procedimentos metodológicos para o cálculo das recargas

A partir de métodos de separação de escoamento é possível identificar em um hidrograma a parcela da vazão que se origina do escoamento superficial bem como aquela porção que advém do escoamento subterrâneo. Vale lembrar que a identificação e a individualização destas parcelas é que permitem estimar a recarga média dos aquíferos sob a perspectiva regional.

Os procedimentos consistiram, essencialmente, na estruturação de uma rotina configurada em ambiente *Visual Basic no Excel*, a partir da qual foram geradas as curvas de recessão de cada ano hidrológico validado pelas análises de consistência dos registros das descargas e a separação dos escoamentos de base e superficial, a fim de quantificar as parcelas relativas apenas às contribuições subterrâneas.

Do ponto de vista hidrogeológico, a análise e interpretação dos dados de interesse ao cômputo da recarga da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira foi pautada pela integração das respostas hidrológicas obtidas a partir de 45 hidrogramas (1962-2007) anuais para a estação Colônia do Jaíba, 30 hidrogramas anuais (1973-2007) para estação Claro dos Poções e 34 para a estação Ponte dos Ciganos (1973-2007).

Pela representação gráfica da vazão em uma dada unidade de tempo, o hidrograma reflete integralmente as características climáticas, fisiográficas e de ocupação humana em uma bacia hidrográfica, atuando como uma espécie de resposta desta à pluviosidade.

De modo geral, é possível identificar três regiões principais em um hidrograma, a saber: i) curva de concentração ou acumulação (de B para C), resultante da pluviosidade e porção onde se verifica o aumento da vazão em função do escoamento superficial; ii) vazão máxima ou pico de cheia (C), que reflete a maior concentração da precipitação na bacia e iii) a curva de recessão ou depleção (de C para E), que assinala o fim do escoamento superficial e marca o instante em que o escoamento subterrâneo passa a responder pela totalidade da vazão do curso de água (Figura 6.38).

Conforme pode ser visualizado a seguir, a curva de recessão é subdividida em duas partes: a porção em que se registra uma queda crescente (de C para D) e a região que representa essencialmente a recessão do escoamento de base (de D para E). Em cursos de água intermitentes, podem ser verificados ainda trechos cujo fluxo é igual à zero (de H até I).

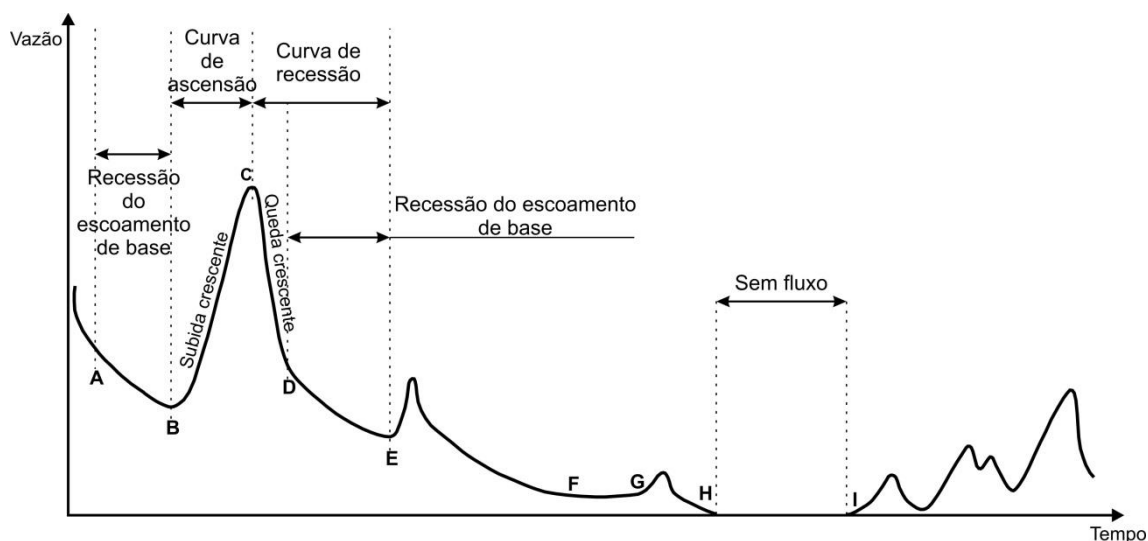


Figura 6.38: Hidrograma e suas regiões principais.

Adaptado de: Aksoy *et al.* 2014.

Ressalta-se que após um evento de chuva, a parte decrescente de um hidrograma (recessão) figura como um reflexo da diminuição do nível da água no aquífero (ou nos aquíferos) de determinada bacia ao longo do tempo. De modo geral, pode-se afirmar que o momento a partir do qual a vazão de um curso de água tem origem exclusivamente subterrânea, corresponde ao instante final da pluviosidade somado ao período correspondente ao tempo de concentração da bacia.

Com o intuito de separar os escoamentos superficial e subterrâneo diversos métodos têm sido propostos, alcançando destaque os métodos gráficos (facilmente aplicados a eventos isolados de chuva) e os filtros numéricos ou digitais, estes amplamente utilizados em hidrogramas de maiores extensões. Para períodos de estiagem, a curva de recessão do hidrograma pode ser aproximada para uma exponencial decrescente, sendo representada pela seguinte equação:

$$Q_{(t)} = Q_0 \times e^{\frac{-1}{k}} \quad \text{(Equação 6.1)}$$

onde t é o tempo, Q_0 representa a vazão em um instante t_0 , $Q_{(t)}$ é a vazão no instante t , e é a base dos logaritmos naturais e k é a constante que tem dimensão de tempo (Collischonn & Tassi, 2008).

Para cada ano hidrológico, portanto, foi calculado um valor para $\frac{-1}{k}$. Este cálculo foi realizado a partir da aproximação da curva no período de recessão com uma curva de tendência exponencial, conforme pode ser visto na Figura 6.39 a seguir.

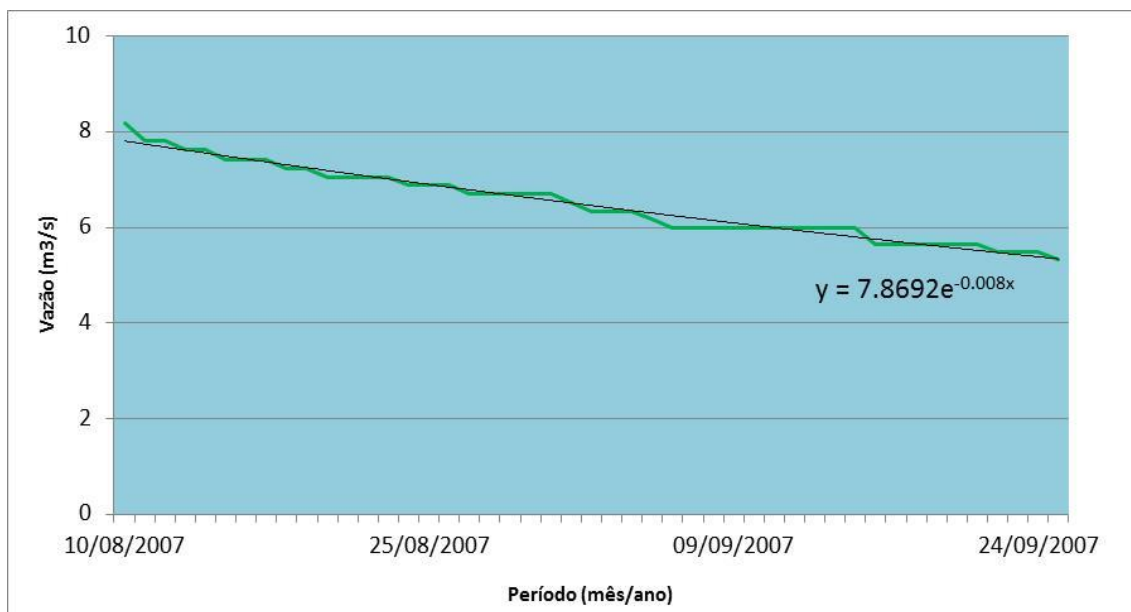


Figura 6.39: Valor de $\frac{-1}{k}$ (retângulo vermelho) a partir da curva exponencial referente ao período de recessão.

Os filtros numéricos permitem separar, de modo aproximado, as componentes superficial e subterrânea de um hidrograma. Para tanto, supõe-se que a vazão total de um hidrograma (y) em um intervalo de tempo (i) é formada pelas componentes escoamento superficial (f) e escoamento subterrâneo (b):

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{(Equação 6.2)}$$

onde i representa o intervalo de tempo adotado.

Considerando a existência de uma relação linear em períodos de estiagem entre o armazenamento de água nos aquíferos e a vazão, pode-se adotar para os períodos sem recarga do aquífero a seguinte equação:

$$b_{i+1} = b_i \times e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad \text{(Equação 6.3)}$$

onde k é a constante e Δt é o tamanho do intervalo de tempo entre i e $i+1$. Esta mesma equação também pode ser expressa por:

$$b_{i+1} = b_i \times a \quad \text{(Equação 6.4)}$$

onde

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad \text{(Equação 6.5)}$$

Uma forma de estimar o valor de b_i para cada intervalo de tempo i foi proposta por Lyne e Hollick (1979) e posteriormente modificada por Chapman (1991) (e.g., Eckhardt, 2005):

$$b_i = \frac{a}{2-a} \times b_{i-1} + \frac{1-a}{2-a} \times y_i \quad \text{(Equação 6.6)}$$

Se a aplicação desta equação resultar em um valor $b_i > y_i$, então $b_i = y_i$.

O filtro acima, denominado neste estudo como “Filtro A”, é recomendado para bacias cuja contribuição de escoamento subterrâneo seja relativamente baixa em relação ao escoamento total. Para bacias em que a contribuição subterrânea é maior, foi proposto por Eckhardt (2005) um filtro (“Filtro B”) com dois parâmetros:

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \times a \times b_{i-1} + (1-a) \times BFI_{max} \times y_i}{(1-a) \times BFI_{max}} \quad \text{(Equação 6.7)}$$

como no caso anterior, limitado a valores b_i menores ou iguais a y_i .

BFI_{max} representa o máximo percentual de escoamento subterrâneo que o filtro permite calcular, e pode ser estimado ao se estender a curva de recessão, de trás pra frente no tempo (recessão inversa):

$$b_i = \frac{b_{i+1}}{a} \quad \text{(Equação 6.8)}$$

limitado a valores b_i menores ou iguais a y_i , como nos casos anteriores. A partir da aplicação da recessão inversa, obtém-se um hidrograma “r” cujos valores são utilizados para o cálculo do BFI_{max} pela fórmula:

$$BFI_{max} \approx \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad \text{(Equação 6.9)}$$

onde N representa o número de intervalos de tempo do hidrograma.

Nas tabelas 6.26 a 6.28 são indicados os percentuais de distribuição de cada uma das tipologias litológicas existentes, considerando-se as bacias de interesse para os cálculos de recarga, quais sejam, Colônia do Jaíba, Claro dos Poções e Ponte dos Ciganos.

Tabela 6.26 – Percentuais de distribuição das litologias: Colônia do Jaíba.

GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA ESTAÇÃO COLÔNIA DO JAÍBA			
Unidade Geológica	Área (km ²)	%	Tipologia Litológica
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	221,22	1,82	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	2.070,56	17,02	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila
Depósitos aluvionares	162,11	1,33	Areia
Lagoa do Jacaré	2.909,68	23,91	Calcarenito, Siltito
Lagoa do Jacaré, calcário	2.146,93	17,64	Calcário
Lagoa do Jacaré, marga	937,20	7,70	Marga, Siltito, Calcário
Lagoa do Jacaré, siltito	744,64	6,12	Siltito
Paraopeba	1.705,08	14,01	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga
Quartzitos	29,21	0,24	
Riacho dos Machados	0,50	0,00	Xisto, Ortoanfibolito
Rio Gorutuba	13,57	0,11	Granodiorito, Granito
Serra de Santa Helena	110,69	0,91	Siltito, Folhelho
Serra do Catuni	341,45	2,81	Metadiamictito, Metasiltito, Quartzito
Três Marias	21,56	0,18	Arcóseo, Argilito, Siltito
Urucuia	753,66	6,19	Arenito conglomerático, Rocha pelítica, Arenito
Total	12.168,05	100	

Tabela 6.27 - Percentuais de distribuição das litologias: Claro dos Poções.

GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA ESTAÇÃO CLARO DOS POÇÕES			
Unidade Geológica	Área (km ²)	%	Tipologia Litológica
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	54,02	12,08	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho
Lagoa do Jacaré	362,60	81,09	Calcarenito, Siltito
Lagoa do Jacaré, calcário	16,86	3,77	Calcário
Paraopeba	13,66	3,05	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga
Total	447,13	100,00	

Tabela 6.28 - Percentuais de distribuição das litologias: Ponte dos Ciganos.

GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA ESTAÇÃO PONTE DOS CIGANOS			
Unidade Geológica	Área (km ²)	%	Tipologia Litológica
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	272,34	19,84	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	4,03	0,29	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila
Depósitos aluvionares	3,82	0,28	Areia
Lagoa do Jacaré	815,15	59,40	Calcarenito, Siltito
Lagoa do Jacaré, calcário	43,52	3,17	Calcário
Paraopeba	0,06	0,00	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga
Urucuia	233,51	17,01	Arenito conglomerático, Rocha pelítica, Arenito
Total	1.372,41	100,00	

A seguir, no item relativo aos resultados de cada uma dessas estações / bacias, estão indicados cada um dos valores de recarga e demais parâmetros de interesse encontrados para os tipos litológicos, conforme apresentado nas Tabelas 6.29 a 6.31.

6.4.3 Resultados de quantificação de recarga

De posse da análise dos hidrogramas de cada uma das três estações fluviométricas adotadas na análise, pôde-se levantar, perante a metodologia descrita anteriormente, os quantitativos referentes às descargas subterrâneas para cada tipologia litológica, bem como os valores médios de recarga anual e seus respectivos percentuais, quando considerada a média pluviométrica obtida pelas isoietas analisadas por sete estações no e em torno da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Os hidrogramas de cada estação de interesse, os quais serviram para caracterizar os volumes médios que representam as descargas oriundas dos aquíferos estão apresentados no ANEXO 2.3. Nestes hidrogramas podem ser visualizados os traçados que representam os filtros adotados nos procedimentos metodológicos (Eckhardt, 2005), e que serviram para identificar os volumes médios de referência (Filtros A e B) adotados como o valor de base assumido para o escoamento subterrâneo (recarga), considerando-se todo o período de medição de descargas de cada estação. Podem ser observados ainda os valores de precipitação, no caso da existência de estações pluviométricas associadas.

Os filtros numéricos permitem separar, de modo aproximado, as componentes superficial e subterrânea de um hidrograma. Para tanto, supõe-se que a vazão total de um hidrograma (y) em um intervalo de tempo (i) é formada pelas componentes escoamento superficial (f) e escoamento subterrâneo (b):

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{(Equação 1)}$$

onde i representa o intervalo de tempo adotado.

Já os hidrogramas representativos de cada uma das bacias e suas respectivas estações podem ser visualizados a seguir, através das Figuras 6.40 a 6.42.

Considerando-se que cada tipologia litológica apresenta uma determinada característica hidrogeológica, ou seja, suas propriedades físicas intrínsecas permitem que sua capacidade de armazenamento de água seja variável (entre distintos tipos de rocha), o conjunto de rochas presentes numa dada bacia hidrográfica vai definir o potencial médio de água capaz de ser liberada no tempo e no espaço físico da bacia hidrográfica, o que, por sua vez, definirá o volume de descarga específica média numa dada seção fluviométrica e, também, se for o caso, por tipologia litológica.

A análise anual de cada hidrograma, segundo os métodos de aplicação de filtros para separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, revela-se como ferramenta importante para o reconhecimento dessas descargas específicas médias, numa dada seção fluviométrica de interesse.

Já a porosidade efetiva para fluxos, ou porosidade efetiva equivalente, reflete o percentual de água que é capaz de ser transmitida numa dada unidade aquífera. Diversos autores consagrados na literatura apresentam intervalos aceitáveis para estes percentuais (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 1994; Domenico & Schwartz, 1998), a partir dos quais inicia-se o processo de seleção do melhor valor que se ajusta à recarga do domínio hidrográfico de interesse.

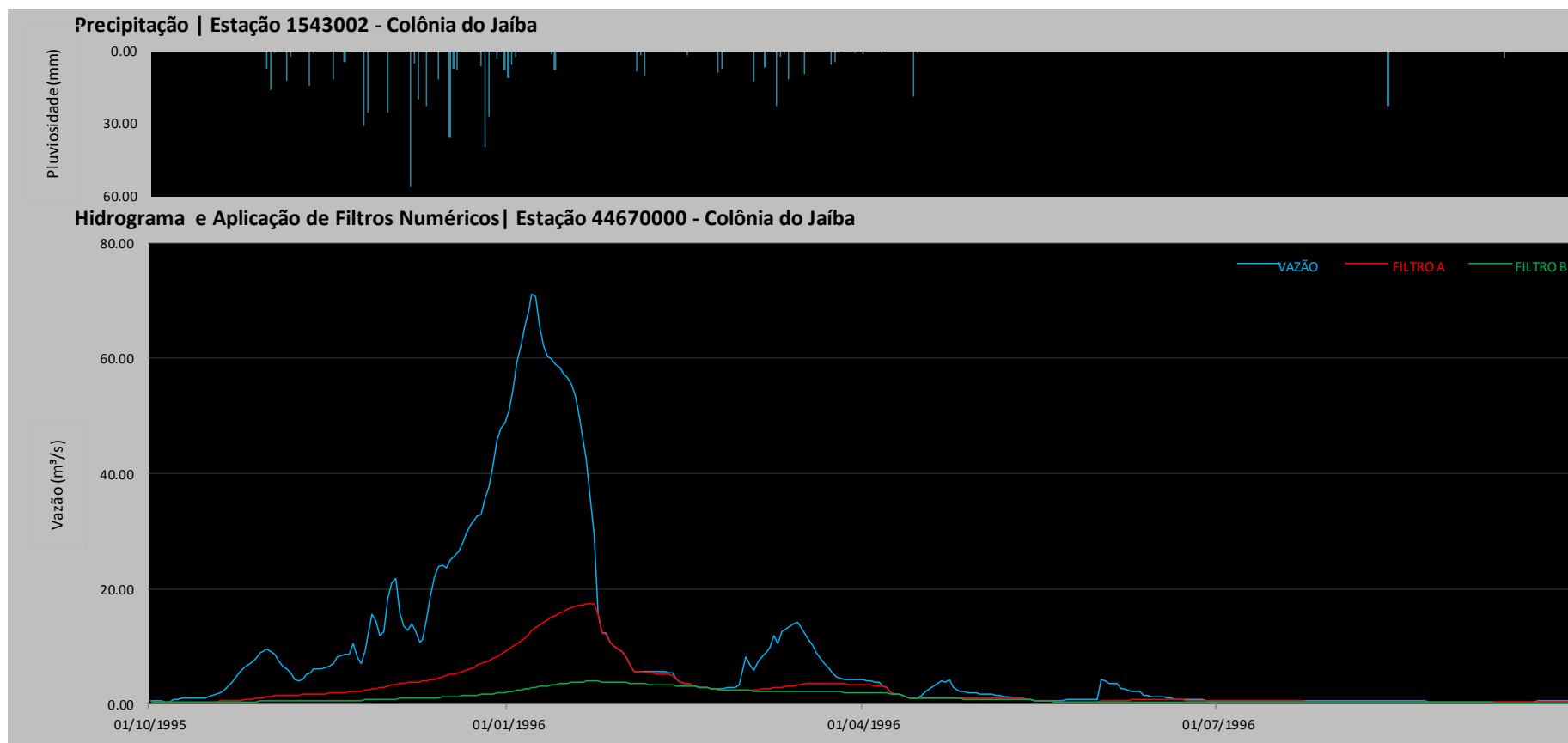


Figura 6.40: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Colônia do Jaíba (Código ANA 44670000) e da Estação Pluviométrica Colônia do Jaíba (Código ANA 1543002), no ano hidrológico 1995-1996.

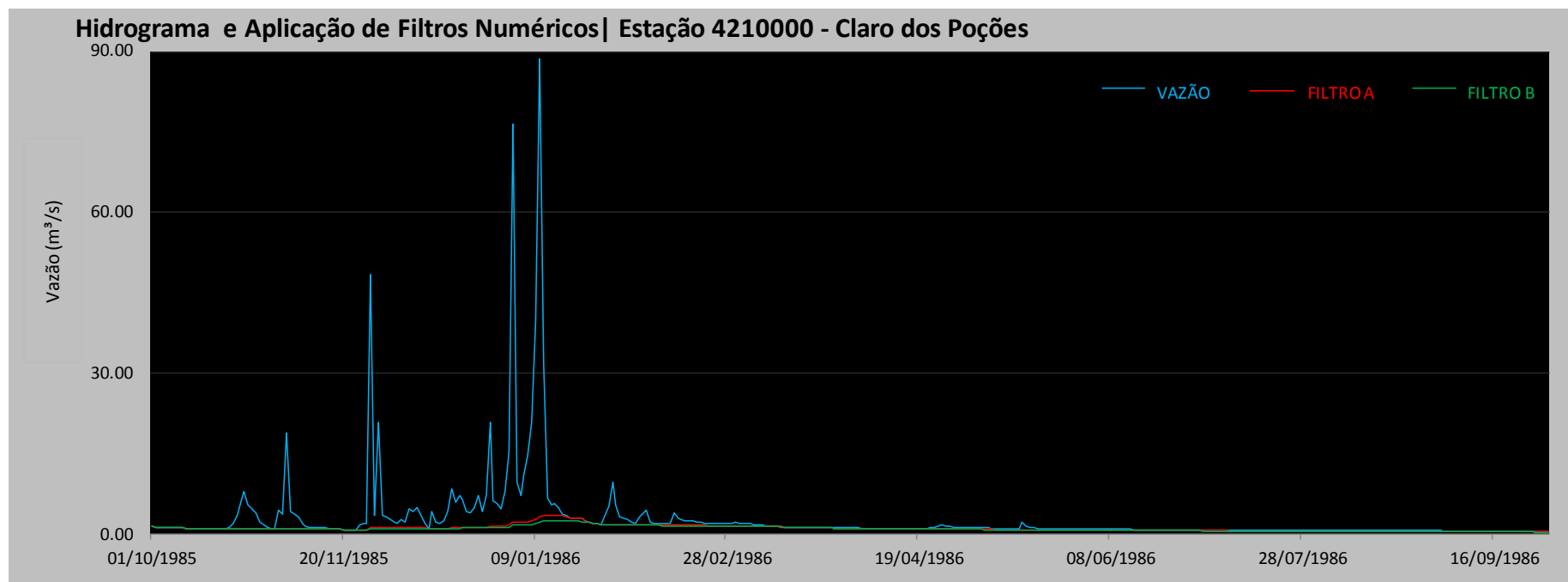


Figura 6.41: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Claro dos Poções (Código ANA 42100000).

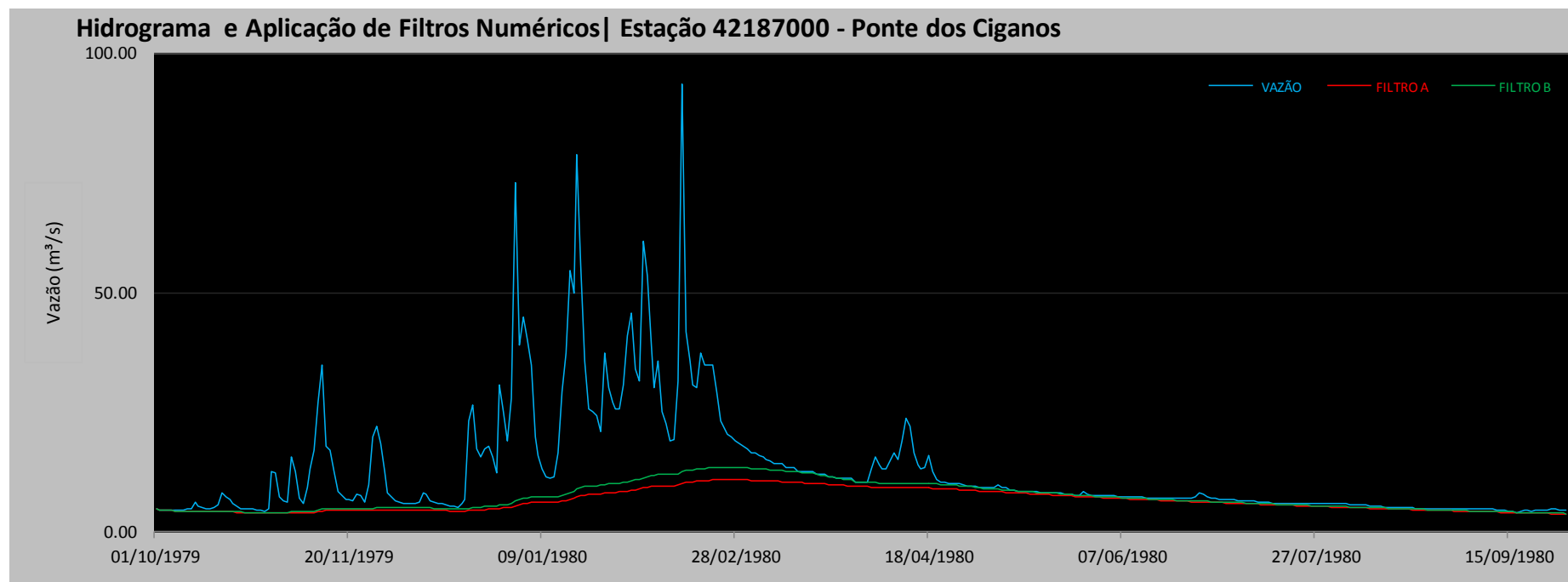


Figura 6.42: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Ponte dos Ciganos (Código ANA 42187000).

Assim, a partir do montante calculado para o escoamento subterrâneo médio da bacia (dados obtidos pela análise dos hidrogramas) é feito o cálculo da recarga específica média dos aquíferos da bacia, dividindo o valor do escoamento subterrâneo pela área total da bacia a montante da estação fluviométrica de referência (valor dado em L/s/km²). Os valores de recarga específica de cada litologia (L/s/km²) são calculados utilizando: o montante total obtido para o escoamento subterrâneo na bacia, a área de cada litologia e o valor de porosidade efetiva para fluxo atribuído para as distintas litologias. Esses valores podem ser traduzidos como recarga, podendo ser expressos em mm/anuais ou em termos percentuais em relação a um valor médio de precipitação.

Os resultados finais para os volumes médios de recarga por litologia são apresentados nas Tabelas 6.29 a 6.31, a seguir.

Na Tabela 6.29, apresentam-se os valores resultantes das análises realizadas para a bacia demarcada pela Estação Colônia do Jaíba, cujos cálculos levam em consideração uma área que totaliza 12.168,05 km². Na Tabela 6.30, são apresentados os valores resultantes das análises realizadas para a bacia demarcada pela Estação Claro dos Poções, cujos cálculos levam em consideração uma área total de 447,13 km². Na Tabela 6.31, são apresentados os valores resultantes das análises realizadas para a bacia demarcada pela Estação Ponte dos Ciganos, cujos cálculos levam em consideração uma área total de 1372,41 km².

6.4.4.1 Estação Colônia do Jaíba

Considerando-se as separações do escoamento superficial e subterrâneo, obtidas através dos hidrogramas, verificou-se que a recarga específica média da bacia apresentou um valor muito baixo para o referido ambiente hidrogeológico, ou seja, apenas 0,51 L/s/km².

Como observado através dos resultados encontrados junto à bacia conformada pela estação fluviométrica Colônia do Jaíba, o valor de 0,51 L/s/km² indica que a recarga média do domínio equivale a 1,69% da precipitação média anual assumida, que corresponde a 950 mm, ou seja, 16,1 mm anuais apenas. Partindo-se da análise dos hidrogramas das estações vizinhas à área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, verifica-se que os valores de recarga obtidos para um cenário similar em termos litológicos são maiores, sendo esses últimos resultados mais coerentes com o cenário hidrogeológico investigado do que o valor obtido na estação Colônia do Jaíba.

6.4.4.2 Estação Claro dos Poções

Pela separação do escoamento superficial e subterrâneo realizada através dos hidrogramas anuais dessa estação, verificou-se que a recarga específica da bacia corresponde a 2,31 L/s/km², o que, em comparação com o valor encontrado na estação Colônia do Jaíba, reflete um volume quase 5 vezes superior.

Neste caso, foi considerada uma precipitação média anual de 1100 mm assumida para pluviosidade média dessa zona de contribuição, que é vizinha à área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira. Os resultados obtidos

indicam um valor relativo ao percentual médio de recarga de 6,62%, ou seja, 72,85 mm anuais.

6.4.4.3 Estação Ponte dos Ciganos

Do mesmo modo, tendo sido realizada a separação do escoamento superficial e subterrâneo através dos hidrogramas anuais dessa estação, verificou-se que a recarga específica da bacia apresentou um valor de $2,24 \text{ L/s/km}^2$, o que, em comparação com o valor encontrado na estação Colônia do Jaíba, reflete um volume também quase 5 vezes superior, mas extremamente similar ao da zona de contribuição conformada pela estação de Claro dos Poções, junto a sua drenagem vizinha do Rio Pacuí. Neste caso, foi considerada uma precipitação média anual de 1100 mm como média dessa zona de contribuição, também contígua à área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Figura 6.40). Os resultados obtidos indicam um valor relativo ao percentual médio de recarga de 6,42%, ou seja, 70,64 mm anuais.

Tabela 6.29 – Valores de recarga específica para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Colônia do Jaíba.

	Colônia do Jaíba - Formações Geológicas	Tipos Litológicos por Unidade Mapeada	Área		Recarga Específica l/s.km ²	Recarga Média Anual (PPT=950mm)	Percentual de Recarga
			(km ²)	%			
Bacia do rio Verde Grande	Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho	221,22	1,82	0,57	18,10	1,51%
	Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila	2.070,56	17,02	0,49	15,39	1,28%
	Depósitos aluvionares	Areia	162,11	1,33	1,43	45,25	3,77%
	Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito	2.909,68	23,91	0,43	13,58	1,13%
	Lagoa do Jacaré, calcário	Calcário	2.146,93	17,64	0,72	22,63	1,89%
	Lagoa do Jacaré, marga	Marga, Siltito, Calcário	937,20	7,70	0,20	6,34	0,53%
	Lagoa do Jacaré, siltito	Siltito	744,64	6,12	0,14	4,53	0,38%
	Paraopeba	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	1.705,08	14,01	0,57	18,10	1,51%
	Quartzitos		29,21	0,24	0,52	16,29	1,36%
	Riacho dos Machados	Xisto, Ortoanfíbolito	0,50	0,00	0,14	4,53	0,38%
	Rio Gorutuba	Granodiorito, Granito	13,57	0,11	0,20	6,34	0,53%
	Serra de Santa Helena	Siltito, Folhelho	110,69	0,91	0,20	6,34	0,53%
	Serra do Catuni	Metadiamicrito, Metasiltito, Quartzito	341,45	2,81	0,23	7,24	0,60%
	Três Marias	Arcóseo, Argilito, Siltito	21,56	0,18	0,09	2,72	0,23%
	Urucuia	Arenito conglomerático, Rocha pelítica, Arenito	753,66	6,19	0,86	27,15	2,26%
Total			12.168,05	100,00			

Tabela 6.30 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Claro dos Poções.

Bacia do rio São Lamberto	Claro dos Poções - Formações Geológicas	Tipos Litológicos por Unidade Mapeada	Área		Recarga Específica l/s.km ²	Recarga Média Anual (PPT=1100mm)	Percentual de Recarga
			(km ²)	%			
	Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho	54,02	12,08	3,58	112,81	10,26%
	Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito	362,60	81,09	1,99	62,67	5,70%
	Lagoa do Jacaré, calcário	Calcário	16,86	3,77	4,97	156,68	14,24%
	Paraopeba	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	13,66	3,05	2,58	81,47	7,41%
	Total		447,13	100,00			

Tabela 6.31 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Ponte dos Ciganos.

Bacia do rio Pacuí	Ponte dos Ciganos - Formações Geológicas	Tipos Litológicos por Unidade Mapeada	Área		Recarga Específica l/s.km ²	Recarga Média Anual (PPT=1100m m)	Percentual de Recarga
			(km ²)	%			
	Coberturas detrítico-lateríticas com concreções ferruginosas	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho	272,34	19,84	3,00	94,55	8,60%
	Coberturas detrítico-lateríticas ferruginosas	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila	4,03	0,29	2,44	77,04	7,00%
	Depósitos aluvionares	Areia	3,82	0,28	4,44	140,07	12,73%
	Lagoa do Jacaré	Calcarenito, Siltito	815,15	59,4	1,44	45,52	4,14%
	Lagoa do Jacaré, calcário	Calcário	43,52	3,17	2,78	87,54	7,96%
	Paraopeba	Calcarenito, Arcóseo, Dolomito, Siltito, Folhelho, Argilito, Ritmito, Marga	0,06	0,00	1,22	38,52	3,50%
	Urucuia	Arenito conglomerático, Rocha pelítica, Arenito	233,51	17,01	4,00	126,06	11,46%
	Total		1.372,4	100			

6.4.5 Considerações finais

Conforme valores encontrados para as recargas dos aquíferos contidos no polígono delimitado para as bacias vizinhas à área piloto da Bacia do Rio do Vieira, principalmente Claro dos Poções e Ponte dos Ciganos, verificou-se haver, comparativamente aos valores encontrados, perdas significativas dos volumes infiltrados para outras sub-bacias, na porção de cabeceira e em outras porções do Rio Verde Grande. Este fato tem se mostrado recorrente no sistema cárstico da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, como demonstrado em outros exemplos do ambiente cárstico em diversas regiões.

Neste sentido, ressalta-se a importância da aplicação dessa metodologia de análise hidrogeodinâmica integrada das parcelas que circulam num dado ambiente. Como princípio básico, o entendimento conjunto de suas parcelas circulantes (precipitação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo) deve estar sempre e inexoravelmente associado a um dado sistema aquífero, uma vez que é exatamente esse ambiente que funciona como uma válvula de controle dos aportes meteóricos, permitindo ou inibindo sua entrada, restando por maior ou menor intervalo de tempo o seu trânsito, e retornando suas parcelas em maior ou menor escala rumo às calhas de drenagem, para manutenção de suas descargas.

A Tabela 6.32 exhibe os valores médios ponderados a partir das informações apresentadas nas tabelas 6.29, 6.30 e 6.31 e a proporção da área de cada uma contida na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Desse modo, em termos médios anuais, a média geral de recarga para a área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira corresponde a cerca de $7,25 \times 10^7$ m³/ano, aproximadamente 2.297,6 L/s ou 125,1 mm/ano, o que corresponde a 11,4% da precipitação média local, considerando-se o valor de 1100 mm anuais. Com o intuito de organizar as informações obtidas no cômputo das recargas da área piloto do Rio do Vieira, considerando-se a distribuição geográfica dos pontos de tomada da informação primária e o foco do estudo voltado à gestão dos sistemas aquíferos cársticos, apresenta-se uma sugestão de expansão da área piloto original, delimitada por bacias vizinhas e por parte da bacia hidrográfica do Rio Verde Grande, uma vez que a estação Colônia do Jaíba adotada para compor o estudo, situa-se em posição muito distante da área de interesse. Desse modo, são sugeridas a partir da Figura 6.43, estações fluviométricas para implantação em pontos estratégicos do sistema, bem como as condições de contorno julgadas adequadas, no momento, à criação de um domínio de controle mais assertivo sobre o cômputo das recargas incidentes, não só consubstanciando as informações levantadas, mas possibilitando o rearranjo espacial das condições de contorno do sistema hidrogeológico.

No que tange ainda às questões observadas nas estimativas de recarga para o vasto domínio abrangido pela estação Colônia do Jaíba, caso fossem utilizados valores apropriados de recessão média específica na referida estação, com base nos tipos litológicos existentes, as recargas obtidas totalizariam cerca de 36 m³/s, ou seja, aproximadamente 6 vezes superior ao valor encontrado a partir das recessões medidas. Neste caso, o volume médio de recarga anual para o citado domínio representaria um valor médio percentual equivalente a 10% das precipitações, ou cerca de 94 mm anuais.

Tabela 6.32 – Resultados de recarga encontrados para a área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

VALORES DE RECARGA PARA A ÁREA PILOTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO VIEIRA						
Unidade Geológica	Área (km ²)	%	Tipologia Litológica	Recarga Específica Média (L/s.km ²)	Volume médio de recarga (L/s)	Porosidade Efetiva Média adotada Nef (%)
Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	27,01	4,66	Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila, Depósitos de cascalho	3,58	96,63	0,09
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	9,41	1,62	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia, Depósitos de argila	6,42	60,42	0,11
Formação Lagoa do Jacaré	186,51	32,20	Calcarenito, Siltito	1,99	370,66	0,05
Formação Lagoa do Jacaré, calcário	356,23	61,51	Calcário	4,97	1769,89	0,125

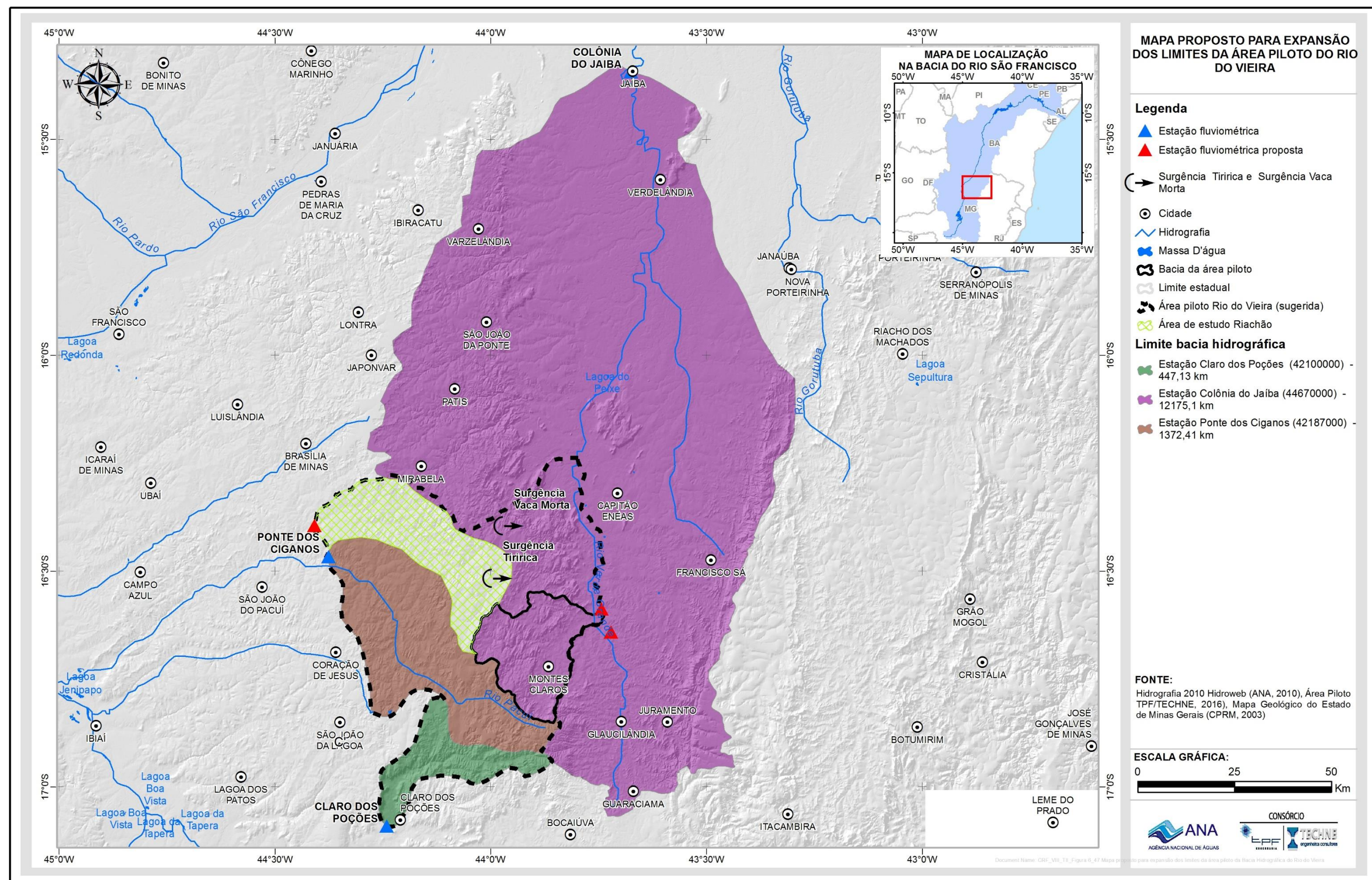


Figura 6.43: Mapa proposto para expansão dos limites da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

6.5 Reservas, recursos e exploração

As reservas permanentes de água subterrânea se traduzem por volumes que representam a totalidade da água armazenada em um aquífero ou sistema aquífero, sem participar do escoamento sazonal. Assim, as unidades que expressam as reservas permanentes de água subterrânea têm dimensão L^3 , sendo comum a utilização do metro cúbico, hectômetro cúbico ou mesmo o litro.

A utilização da água subterrânea, ou seja, a retirada de volumes de água de um dado aquífero destina-se por sua vez a um consumo, seja ele abastecimento público, industrial, irrigação ou outros. Este consumo ocorre invariavelmente a certa taxa temporal. É natural e intuitiva, portanto, a consideração da variável tempo na exploração de recursos hídricos em geral. No que diz respeito à recarga dos aquíferos, por outro lado, verifica-se que sua descrição também requer a introdução da variável tempo. Dessa maneira, tanto os volumes explorados dos aquíferos como aqueles aí repostos têm dimensão L^3T^{-1} , sendo considerados como recursos (Feitosa *et al*, 2008).

6.5.1 Reservas permanentes

A reserva permanente de um dado aquífero é dada por sua área de ocorrência (A) x espessura saturada (b) x porosidade efetiva equivalente (η_e). Os valores dos parâmetros utilizados nesta expressão e os resultados obtidos são apresentados adiante, onde oportuno, em tabelas específicas.

Considerando que as dissoluções cársticas ocorrem predominantemente acima de 120 metros de profundidade, com escassa probabilidade de sucesso de perfurações que, improdutivas até essa profundidade, sejam aprofundadas além. Como o nível estático médio é da ordem de 20 metros, considerar uma espessura saturada de 100 metros afigura-se como verossímil. A área de afloramento deste aquífero, por sua vez, será considerada como 579 km² que é a área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.

No que diz respeito à porosidade efetiva utilizadas na avaliação da contribuição dos diferentes aquíferos às descargas de base medidas nos hidrogramas, será considerada uma porosidade efetiva equivalente média de 0,12 para o aquífero cárstico aflorante desenvolvido na Formação Lagoa do Jacaré (conforme apresentado na Tabela 6.32).

A reserva permanente deste aquífero (RP) será dada, portanto, por: área de ocorrência (A) x espessura saturada (b) x porosidade efetiva equivalente (η_e)

- $RP = A \times b \times \eta_e = 579,0 \text{ km}^2 \times 0,10 \text{ km} \times 0,12 = 6,95 \text{ km}^3 \text{ ou } 6.950,0 \text{ hm}^3$

6.5.2 Reserva reguladora ou recarga

A recarga corresponde à parcela da precipitação pluviométrica média anual que se infiltra e efetivamente alcança os aquíferos livres, constituindo assim a reserva renovável ou reguladora. A recarga avaliada a partir da análise de hidrogramas é de 79,2 mm/ano (45,9 hm³/ano).

Foram feitas no âmbito do presente estudo, com efeito, duas campanhas de medição de níveis, sendo a primeira no período seco, em agosto/2014, e a segunda logo após o período chuvoso, nos meses de março e abril de 2015

(Figura 6.44). Foram 14 poços observados no âmbito da área piloto, mostrados na Tabela 6.33.

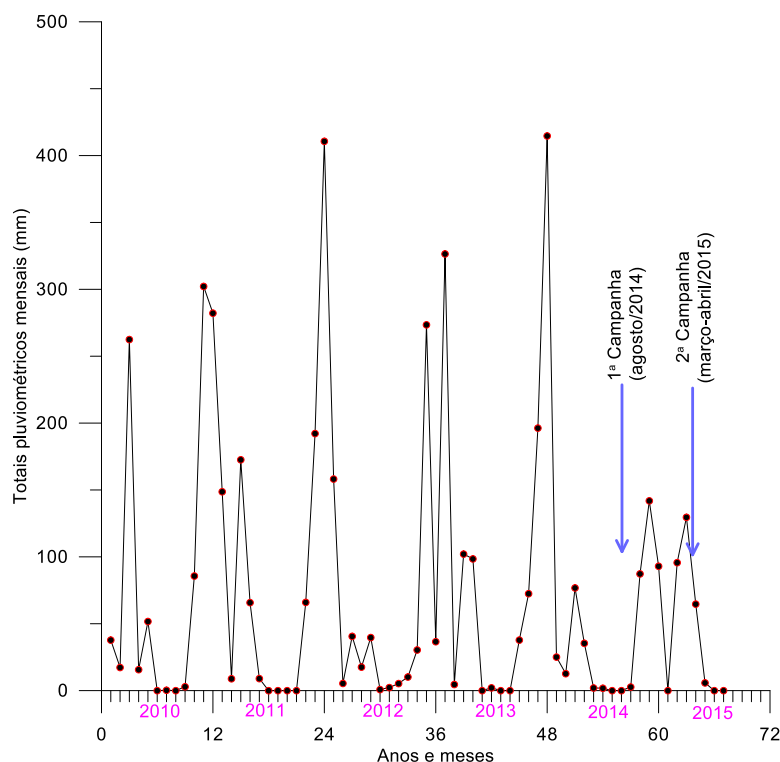


Figura 6.44: Variações pluviométricas e datas das campanhas de medição de níveis estáticos.

Fonte: INMET, estação 83437/Montes Claros.

Tabela 6.33 – Duas campanhas de medição de níveis na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira

IDENT	IDENT ANTIGA	FUSO	UTM X	UTM Y	DATA	NE 1 (m)	NE 2 (m)	Δ NE (m)
C-043	MC034P	23K	615010	8138635	19/03/2015	6,92	5,18	-1,74
C-044	MO2	23K	619183	8147286	26/03/2015	8,75	7,6	-1,15
C-045A	-	23K	622188	8151662	23/04/2015	10,17	14,77	4,6
C-046	MC033P	23K	614879	8138815	19/03/2015	32,55	26,51	-6,04
C-047	3100012703	23K	622003	8151435	23/03/2015	13,16	14,47	1,31
C-048	3100012514	23K	615917	8157523	19/03/2015	8,52	42,5	33,98
C-049	3100012513	23K	615568	8157448	19/03/2015	22,33	39,29	16,96
C-050	MC-045P	23K	622138	8154677	24/03/2015	14,36	14,41	0,05
C-051	3100020692	23K	621997	8154812	24/03/2015	14,8	14,82	0,02
C-052	MC211	23K	613535	8167139	23/04/2015	23	26,8	3,8
C-053	MC213	23K	613915	8168224	23/04/2015	21,53	22,57	1,04
C-054	MC075P	23K	635684	8157598	27/03/2015	28	31,07	3,07
C-055	MC074P	23K	635681	8157821	27/03/2015	59,15	60,37	1,22
C-057	3100013300	23K	627141	8163732	04/05/2015	6,07	10,26	4,19

Chama a atenção, na Tabela 6.33, o fato de que em 11 dos 14 poços medidos o nível estático apresentou-se, na segunda campanha, mais profundo que na primeira campanha. Esse comportamento não era esperado, uma vez que a segunda campanha foi realizada após o período chuvoso de 2014/2015. Uma

explicação para esse comportamento, aparentemente anômalo, pode ser a seguinte:

Entre 2010 e 2014 (Figura 6.44) a pluviometria dos meses de novembro, dezembro e janeiro foi significativa, com valores que atingiram até 400 mm nos meses de dezembro. De 2014 para 2015, entretanto, a pluviometria dos meses em questão foi excepcionalmente baixa, com o maior valor chegando aos 150 mm em novembro/2014. Assim, o pequeno volume de água aportado pelas chuvas de 2014/2015 não teria sido suficiente para compensar o rebaixamento regional causado pela soma de: (a) depleção natural do armazenamento; (b) bombeamentos na área urbana de Montes Claros. Os níveis continuaram, assim, rebaixando. Em outras palavras, os calcários superiores e os metasiltilitos inferiores entraram num processo de recessão iniciado em maio/2014 após as chuvas do inverno 2013/2014. As chuvas do período chuvoso 2014/2015 simplesmente não foram suficientes para reverter essa recessão que, assim, continuou.

No zoneamento de vazões da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira (Figura 6.4) verifica-se que predominam vazões inferiores a 25,0 m³/h, principalmente na área urbana. As maiores vazões, geralmente entre 40 m³/h e 80 m³/h, ocorrem em manchas isoladas que, embora dispostas em alinhamentos, sugerem carstificações localizadas, de dimensões reduzidas e sem grandes comunicações hidráulicas com áreas vizinhas.

Nas proximidades de uma das manchas acima citadas, a noroeste da zona urbana de Montes Claros, foram medidos os poços SIAGAS 3100012513 e 3100012514 (C-048 e C-049 na Tabela 6.33) espaçados de 430 metros. Esses poços situam-se em cotas elevadas, no domínio dos calcários escuros da porção superior da Formação Lagoa do Jacaré, na periferia nordeste do Parque Estadual da Lapa Grande. O rebaixamento dos níveis de água nesses poços, entre agosto/2014 e abril/2015, destoa fortemente dos rebaixamentos observados na planície (ver Tabela 6.33). O SIAGAS mostra apenas 5 poços razoavelmente espaçados nessa área, pelo que não se acredita que interferências tenham contribuído grandemente para os severos rebaixamentos de 34 e 17 metros observados, que levaram os níveis para algo em torno dos 40 metros de profundidade.

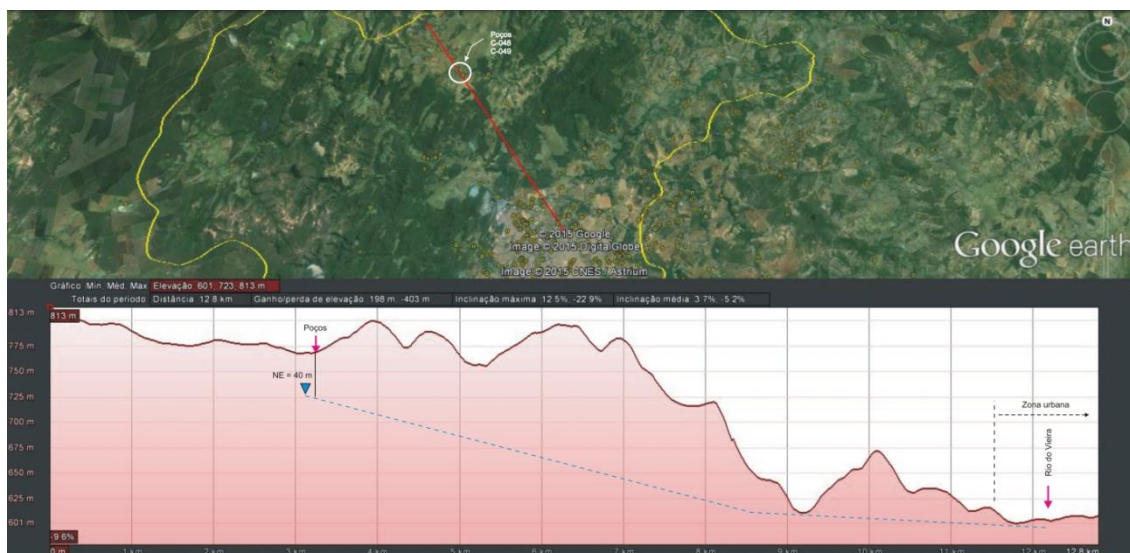


Figura 6.45: Gradiente hidráulico esquemático na Formação Lagoa do Jacaré.

A causa do grande aprofundamento do freático, nesta área, parece ser, assim, a depleção natural favorecida pelos seguintes aspectos:

- A cota topográfica que provê gradientes hidráulicos fortes (Figura 6.45);
- A falta de uma recarga suficiente no período 2014/2015;
- A posição dos dois poços num alinhamento NNE-SSW de prováveis estruturas cársticas (ver Figura 6.4) que deve ter favorecido o fluxo depletivo.

6.5.3 Exploração

A exploração de água subterrânea na área piloto do rio do Vieira foi avaliada a partir dos 1062 poços que compõem a planilha de poços da área piloto, estes poços estão apresentados na Figura 6.46.

O termo exploração, aqui, é utilizado para designar os recursos de água subterrânea sendo produzidos pelo conjunto de poços existentes numa dada área. Consideram-se, comumente, os dois tipos de exploração abaixo:

- Exploração efetiva – descarga efetivamente produzida pelos poços, tal como eles se encontram, considerando seus reais regimes de bombeamento;
- Exploração instalada – descarga que esses poços produziram, tal como se encontram, mas considerando um regime contínuo de bombeamento.

Dos 1062 poços existentes na área piloto, 450 não têm a vazão informada. Para completar as lacunas, o seguinte procedimento foi adotado, utilizando-se as vazões informadas.

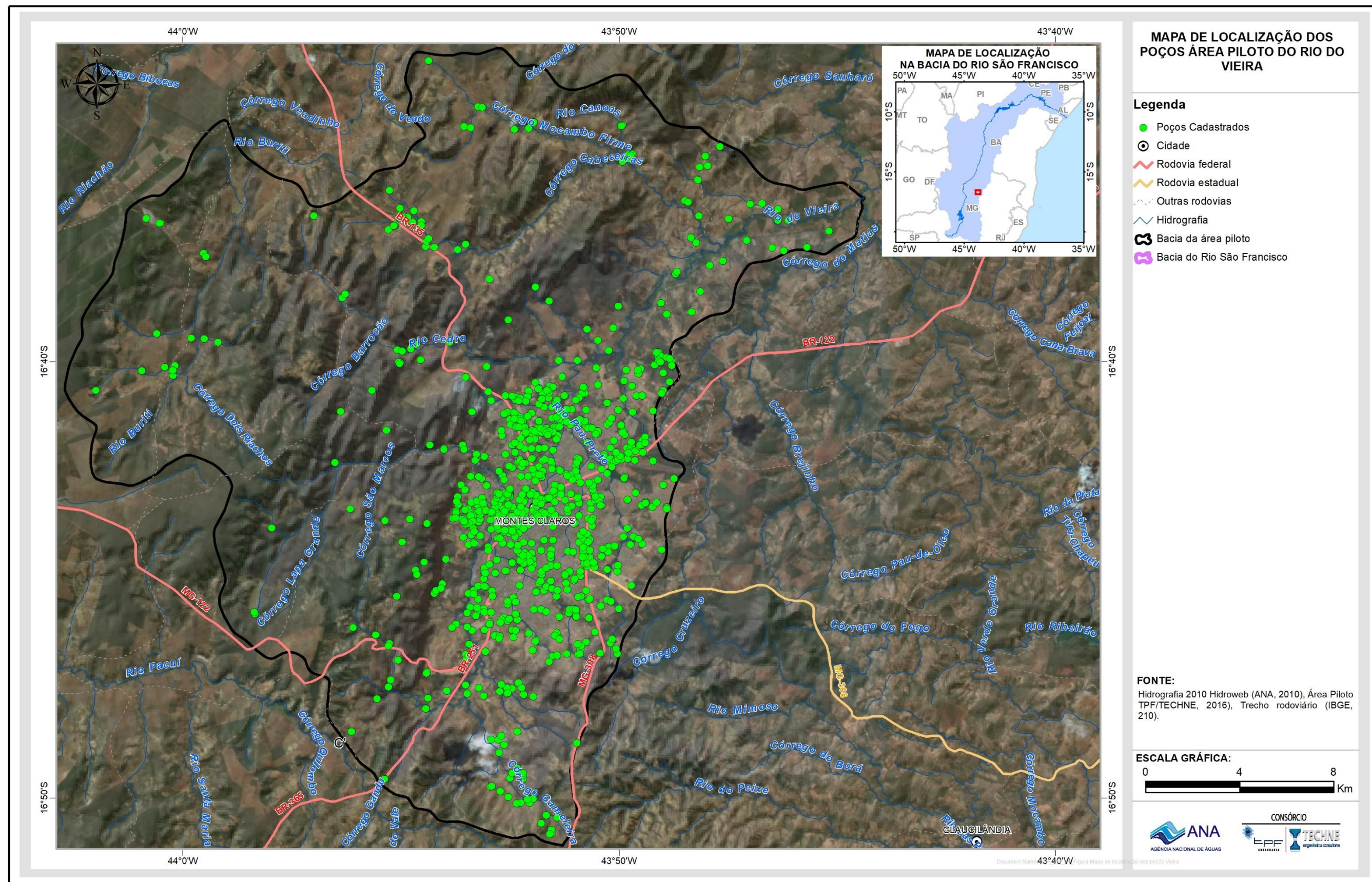


Figura 6.46: Mapa de localização dos poços

- Inicialmente foi construído um histograma de frequências relativas (Figura 6.47), onde se verifica que as vazões obedecem a uma distribuição de frequência assimétrica;

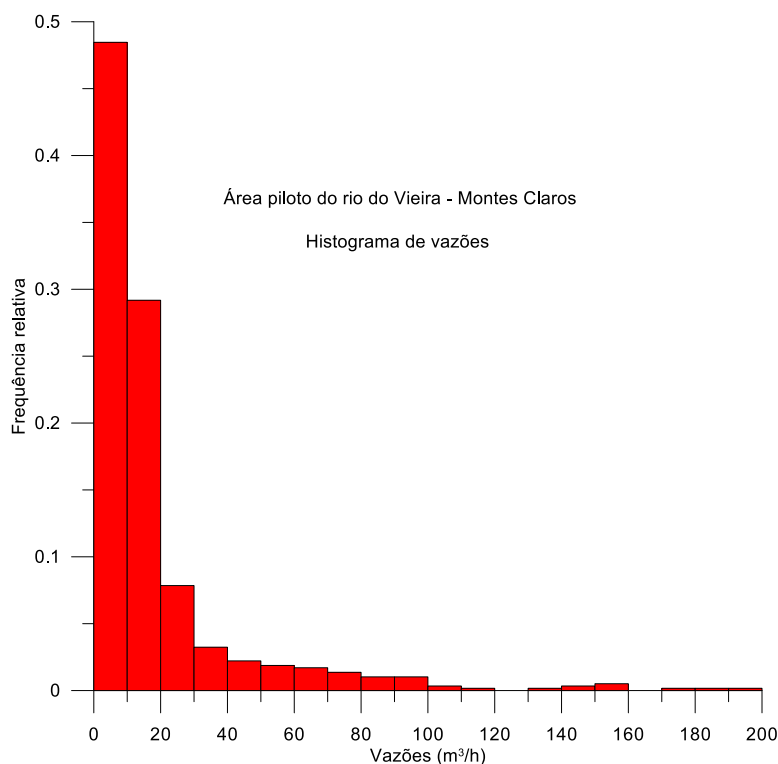


Figura 6.47: Histograma de vazões da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

- Em seguida foi construído um gráfico vazões x frequências relativas (Figura 6.48), utilizando-se as frequências das classes de vazão do histograma. A distribuição dos pontos, nesse gráfico, admite o ajuste de uma lei exponencial, onde o parâmetro $1/\lambda$ representa uma aproximação da média da distribuição de frequências. Essa média, assim, é de 38,0 m³/h. De acordo com o gráfico de frequências acumuladas (Figura 6.49), cerca de 90% das vazões amostradas são iguais ou inferiores a esse valor médio.

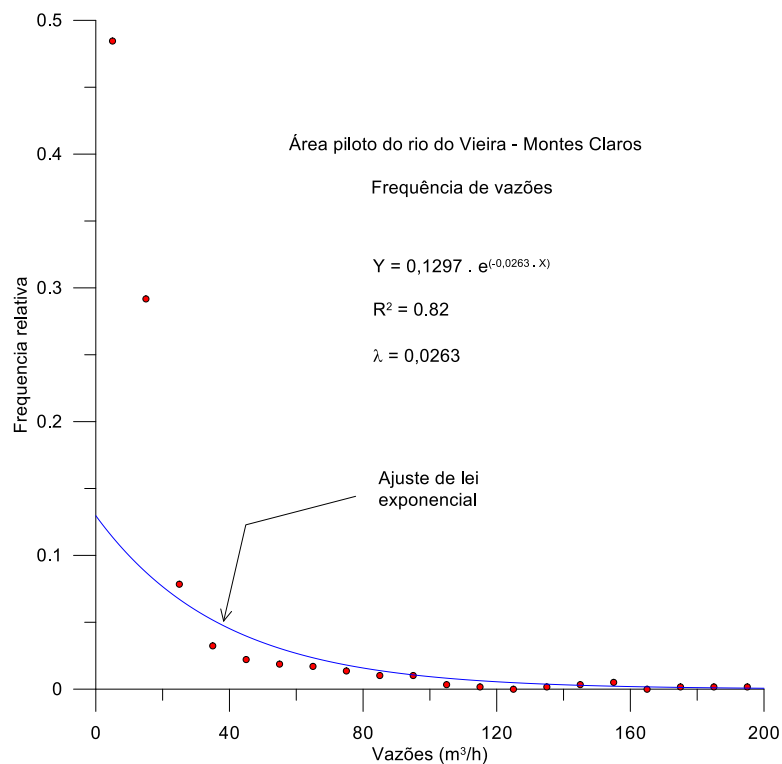


Figura 6.48: Frequências relativas da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

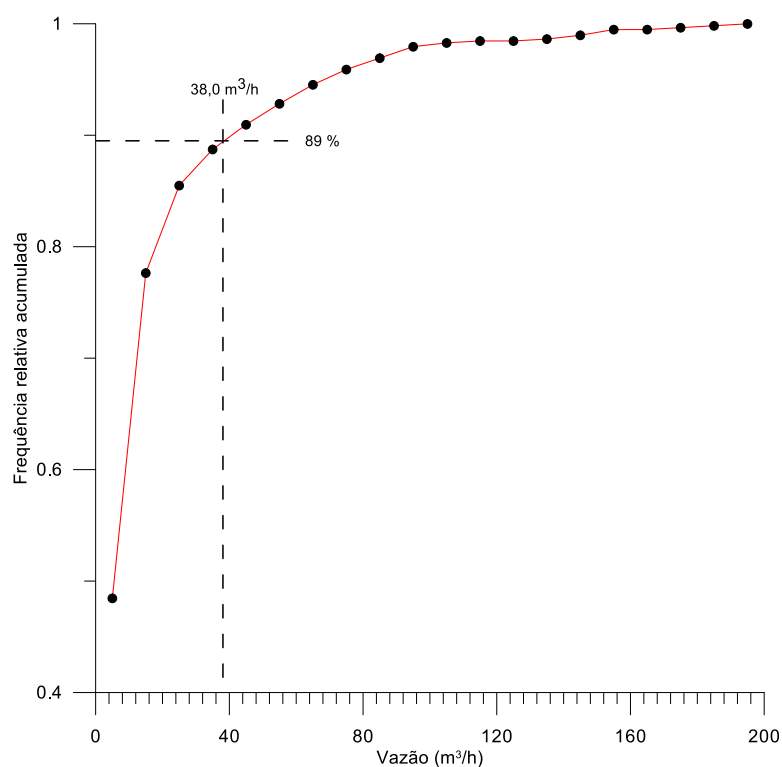


Figura 6.49: Frequências acumuladas das vazões da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

A média de 38,0 m³/h apresentada na Figura 6.48 seria, portanto, adotada para o preenchimento das lacunas na planilha de poços. Porém, considerando que 90% das vazões amostradas são iguais ou inferiores a esse valor médio, será adotada no presente estudo a média aritmética que é de 23 m³/h.

Exploração instalada

Com as lacunas referentes às vazões preenchidas conforme acima discutido, foi possível avaliar a exploração instalada na área piloto da Bacia Hidrográfica do rio do Vieira. Os resultados obtidos apontam para um valor de 38.184,00 m³/h ou 334,00 hm³/ano.

6.5.4 Síntese da Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos

A exploração de água subterrânea foi avaliada a partir dos dados de poços existentes nos cadastros disponíveis. Na Tabela 6.34, são sintetizados as reservas e recursos de água subterrânea avaliados para o aquífero Lagoa do Jacaré na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Os números apresentados na tabela abaixo admitem os seguintes comentários:

- A reserva avaliada (6.950,0 hm³) deve assegurar a reserva explorável a curto prazo, mesmo em períodos de escassez de recarga;
- A exploração instalada (334,00 hm³/ano) representa a exploração máxima possível na área para a atual rede de poços;

Tabela 6.34 – Síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos.

Reserva Permanente (hm ³)	6.950,00
Exploração instalada (hm ³ /ano)	334,0
Recarga (hm ³ /ano)	45,9

Chama a atenção o problema dos poços clandestinos, existe um grande número de poços não cadastrados na área piloto do rio do Vieira, e novos poços são perfurados todos os dias, sem autorização do órgão gestor estadual de recursos hídricos, fazendo com que as avaliações das descargas dos poços fiquem sempre subestimadas.

6.6 Exploração na área piloto da Bacia do Rio do Vieira

A situação da exploração das águas subterrâneas do SAB na área piloto inclui uma estatística descritiva dos dados de poços levantados e catalogados no âmbito do Projeto bem como uma caracterização do regime de funcionamento desses poços e uma estimativa da produção global de água. Com base nessa estimativa foi gerado um balanço entre a oferta e demanda e elaborado um mapa de zoneamento da exploração do aquífero.

6.6.1 Levantamento e sistematização dos dados

Os dados de poços levantados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira foram sistematizados e fazem parte do Sistema de Informações Geográficas do estudo – SIGCARSTE_SF que constitui a principal fonte de consulta sobre poços.

Na Tabela 6.35 é apresentada a estatística descritiva dos valores de profundidade, diâmetro do revestimento, nível estático, nível dinâmico e vazão dos poços cadastrados na parte leste da área piloto.

Tabela 6.35 - Parâmetros estatísticos dos dados de poços da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Parâmetros Estatísticos	Profundidade (m)	Diâmetro da boca (mm)	Nível Estático - NE (m)	Nível Dinâmico - ND (m)	Vazão (m ³ /h)
Média	86,0	159,5	15,8	31,4	21,18
Mediana	80,0	152,4	13,0	29,6	8,8
Desvio Padrão	28,4	20,6	12,0	18,3	41,3
Coeficiente Variação	0,3	0,1	0,8	0,6	1,9
Valor máximo	197,0	300,0	102,7	120,0	360,0
Valor mínimo	24,0	6,0	0,3	0,5	0,2
Nº amostras	708	949	643	587	612

Profundidade

A profundidade dos poços inventariados na área piloto variou de 24 a 197 m, com média de 86 m. A Tabela 6.36 mostra que a maior frequência absoluta das profundidades está na classe de 80 a 100 m.

Tabela 6.36 – Frequência da profundidade dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, IGAM, COPASA e novos poços cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Profundidade (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤20	0	0	0,00	0,00
20<x≤40	12	12	0,02	1,69
40<x≤60	128	140	0,18	19,77
60<x≤80	217	357	0,31	50,42
80<x≤100	198	555	0,28	78,39
x>100	153	708	0,22	100,00
Total	708			

A distribuição da frequência da profundidade dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira pode ser visualizada no diagrama da Figura 6.50.

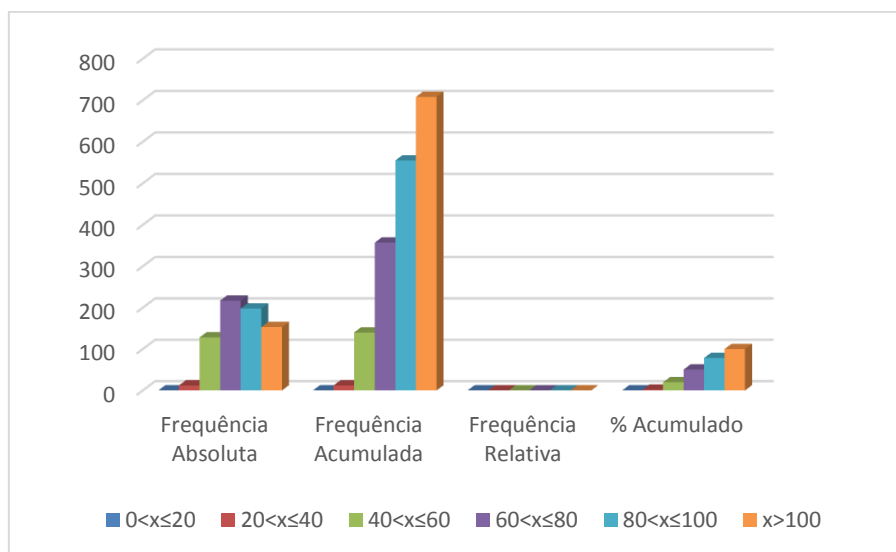


Figura 6.50: Frequências das classes de profundidade dos poços na Área Piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Diâmetro da Boca do Poço

De acordo com a Tabela 6.37 e Figura 6.51, todos os 949 poços que apresentam diâmetro de revestimento informado possuem até 300 mm. Com as duas classes, de 0 a 152 mm e 152 a 300 mm, contendo, respectivamente, 20% e 80%, do total.

Tabela 6.37 – Frequência dos diâmetros de revestimento dos poços tubulares levantados nos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Diâmetro da boca do poço (mm)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤152	189	189	0,20	19,92
152<x≤300	760	949	0,80	100,00
Total	949			

A Figura 6.50 ilustra a distribuição de frequência do diâmetro de revestimento dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

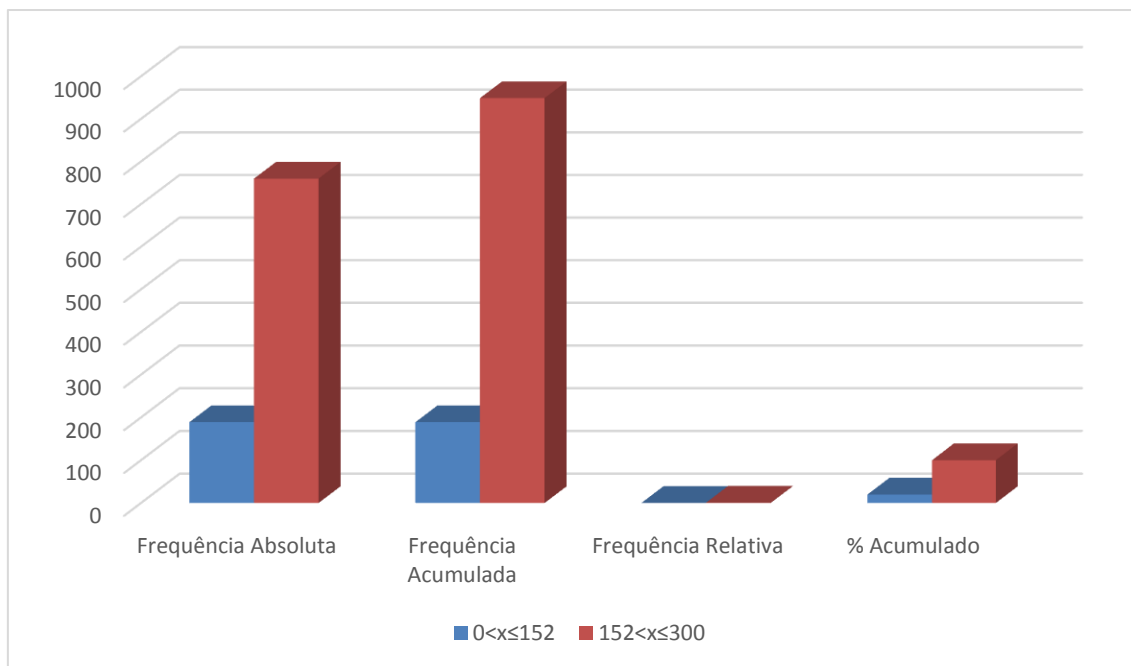


Figura 6.51: Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Nível Estático

De acordo com os dados da Tabela 6.38 e Figura 6.52, observa-se que aproximadamente 70% dos poços apresentam níveis estáticos até 20 m, caracterizando-os como rasos, de modo geral. Nas classes de 20 a 30 m encontram-se cerca de 19% dos poços e no intervalo de poços acima de 30 m estão 11% do total. A rigor, todos esses níveis, notadamente os mais profundos, não são “estáticos”, já que a superfície das águas subterrâneas freáticas sofre notável influência dos poços existentes em exploração.

Tabela 6.38 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços cadastrados na área da bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Nível Estático (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤10	260	260	0,40	40,44
10<x≤20	192	452	0,30	70,30
20<x≤30	123	575	0,19	89,42
x>30	68	643	0,11	100,00
Total	643			

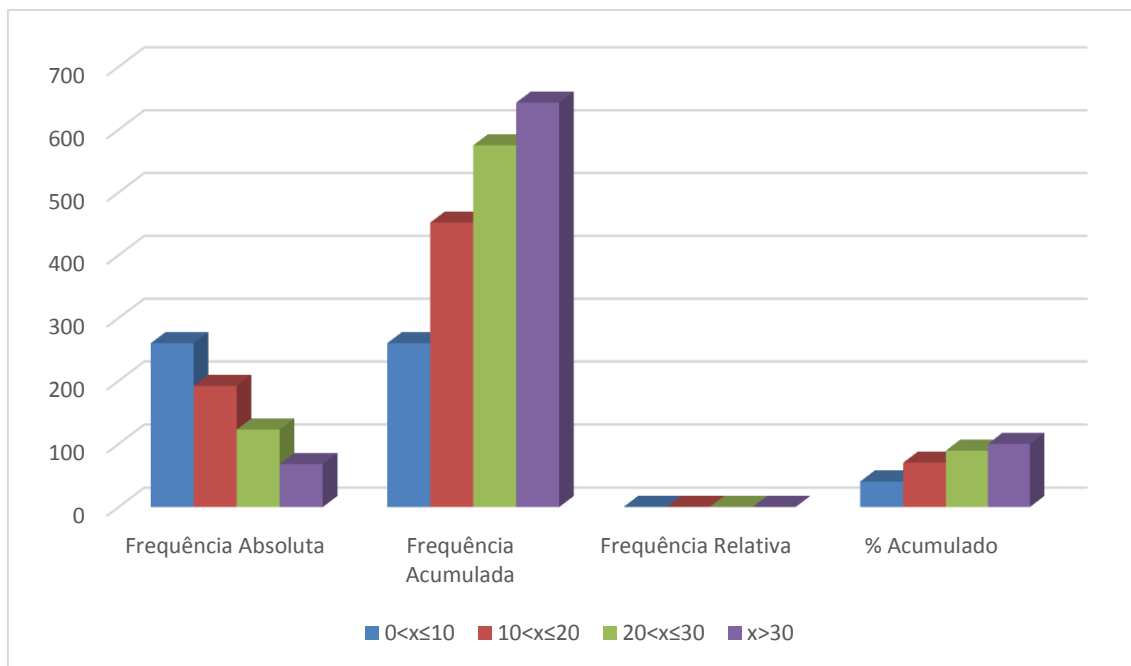


Figura 6.52: Frequências das classes de profundidade dos níveis estáticos dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Nível Dinâmico

Para os níveis dinâmicos dos poços, tem-se que a classe menos frequente corresponde ao intervalo de 0 a 10 m (8,35%). Secundariamente, 22% dos poços (130/587) estão no intervalo entre 10 e 20 m, como pode ser observado na Tabela 6.39 e Figura 6.53. Nota-se, finalmente, que a maior frequência dos níveis dinâmicos (282/587), representando 48%, corresponde à classe de poços com profundidades maiores que 30 metros.

Tabela 6.39 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis dinâmicos dos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Nível Dinâmico (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤10	49	49	0,08	8,35
10<x≤20	130	179	0,22	30,49
20<x≤30	127	306	0,22	52,13
x>30	281	587	0,48	100,00
Total	587			

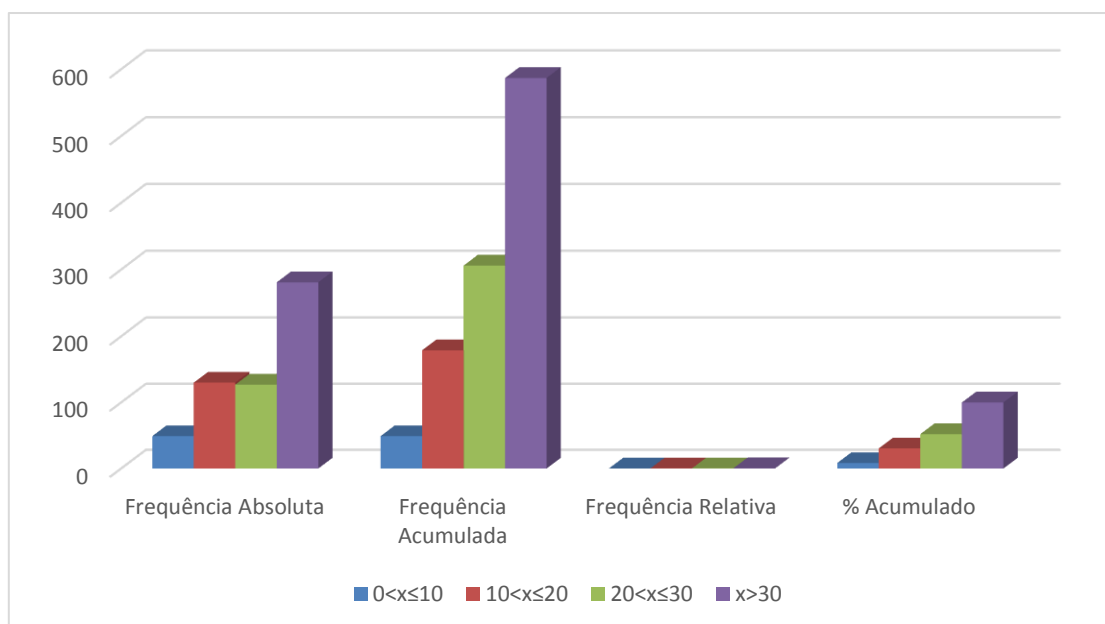


Figura 6.53: Frequências das classes dos níveis dinâmicos dos poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Vazão

No que se refere à vazão dos poços verifica-se que do total de poços catalogados e cadastrados existem 612 poços com vazão informada. Observa-se que a classe mais frequente (Tabela 6.40) é a representada por vazões inferiores a 10 m³/h, com aproximadamente 57% e frequência absoluta de 348 poços. As vazões menos frequentes (9%) estão no intervalo entre 40 e 50 m³/h (Figura 6.54).

Tabela 6.40 – Distribuição de frequência da vazão dos poços cadastrados na área da bacia hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Vazão (m³/h)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0 < x ≤ 10	348	348	0,57	56,86
10 < x ≤ 20	126	474	0,21	77,45
20 < x ≤ 30	53	527	0,09	86,11
30 < x ≤ 40	22	549	0,04	89,71
40 < x ≤ 50	9	558	0,01	91,18
x > 50	54	612	0,09	100,00
Total	612			

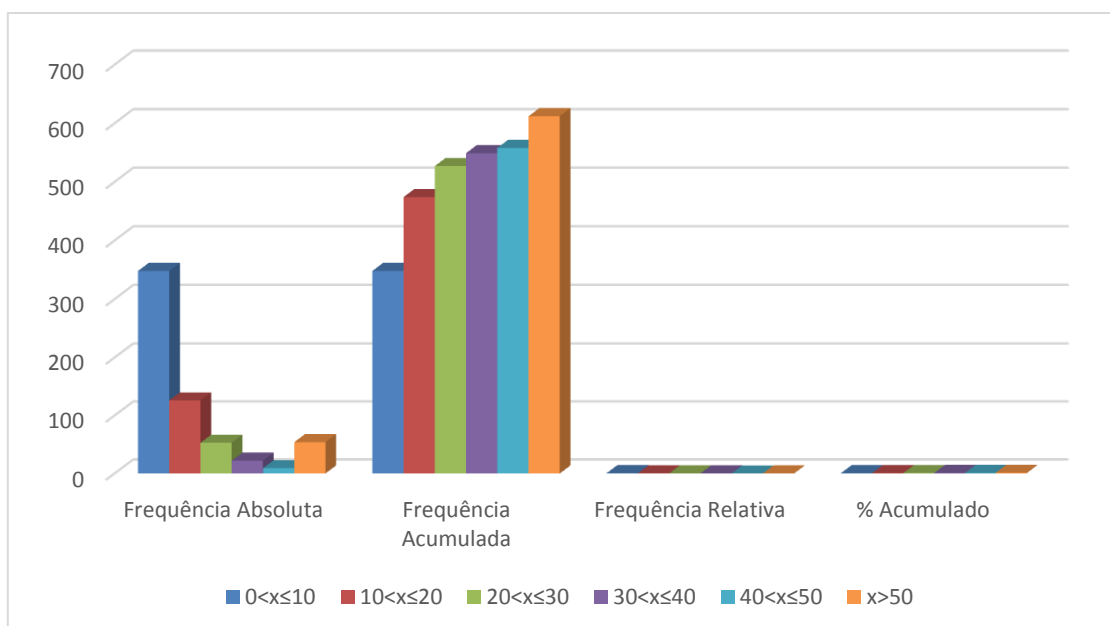


Figura 6.54: Frequências das classes de vazão dos poços cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Um zoneamento de vazões da área piloto é feito a partir dos poços do Siagas com vazão informada, é mostrado na Figura 6.4 e discutido no item 6.3.

Situação operacional

No tocante às condições operacionais dos 1062 poços profundos catalogados, verifica-se na Tabela 6.41 que existem 731 unidades (70,6%) em condições de funcionamento, ou seja, são poços que estão bombeando (24,3%), e poços que estão equipados (46,4%) conforme ANEXO 2.4 – Tabela de poços da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Tabela 6.41 – Situação operacional dos 1062 poços catalogados e cadastrados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Registros	Bombeando	Equipado	Não Utilizável	Parado	Sem informação	Em condições de funcionamento
1062	251	480	15	168	121	731
100%	24,3%	46,4%	1,4%	16,2%	11,7%	70,6%

6.6.1.3 Comentários finais

Com base nos dados apresentados é possível tecer algumas considerações:

- A profundidade dos poços inventariados na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira variou de 24 a 197 m, com média aproximada de 86 m, sendo que os poços nos intervalos acima de 60 metros constituem as classes mais frequentes (81%);

- 40% ou 259 poços possuem níveis estáticos entre 0 e 10 m de profundidade. Vale ressaltar que a rigor esses níveis não são “estáticos”, pois a superfície das águas subterrâneas freáticas sofre notável influência dos poços existentes em exploração;
- As vazões informadas dos poços em cerca de 57% dos casos são menores ou iguais a 10 m³/h e nos 43% restantes oscilam entre mais de 10 m³/h até 51,9 m³/h;
- Em termos de condições operacionais, do total de 1021 poços, 168 estão parados e 15 são considerados sem utilização, ainda 121 poços sem informação sobre o tema. Dos poços em condições de utilização, 251 estão bombeando e 480 equipados na área piloto;
- Em relação ao tipo de equipamento de bombeamento dos poços, verificou-se que nos 493 poços com informações sobre bombas, 2 utilizam bomba injetora, 14 possuem bomba centrífuga, 368 (75%) bomba submersa e 109 (22%) compressores de ar.

Na Tabela 6.42 são mostrados os valores dos parâmetros estatísticos do número de horas por dia em que são bombeados os poços da área estudada, segundo dados do cadastro de água subterrânea realizado no âmbito do projeto.

Existem apenas 161 poços (22%) com regime de funcionamento informado e o cálculo do regime médio de funcionamento para todos os 731 poços, em condições de utilização, é feito usando a média ponderada pela frequência do número de horas de bombeamento, nos intervalos de classe, conforme a expressão:

$$\bar{R}_e = \sum_{j=1}^{13} R_{ej} \times w_j$$

Ou seja, o regime médio estimado é dado pela somatória do regime médio ponderado pela frequência relativa ou fator de ponderação.

Tabela 6.42 – Estimativa do regime médio de funcionamento previsto para poços na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Regime de Funcionamento (h/dia)	Frequência Absoluta (FA)	Regime Médio Informado - R_{ej} (h/dia)	Frequência Relativa - W_j	Regime Médio Ponderado - $R_{ej} \cdot w_j$ (h/dia)
$0 < x \leq 1$	29	0,736	0,180	0,133
$1 < x \leq 2$	32	1,768	0,199	0,351
$2 < x \leq 3$	20	2,652	0,124	0,329
$3 < x \leq 4$	19	3,853	0,118	0,455
$4 < x \leq 5$	7	4,704	0,043	0,205
$5 < x \leq 6$	12	5,828	0,075	0,434
$6 < x \leq 7$	2	7,000	0,012	0,087
$7 < x \leq 8$	8	7,694	0,050	0,382
$8 < x \leq 9$	4	8,575	0,025	0,213
$9 < x \leq 10$	3	10,000	0,019	0,186
$10 < x \leq 11$	2	10,875	0,012	0,135
$11 < x \leq 12$	3	12,000	0,019	0,224
$12 < x \leq 24$	20	16,618	0,124	2,064
Total	161			5,199

Legenda:

$N = \sum n_j$ = número total de poços com regime de funcionamento informado no cadastro de água subterrânea realizado ao longo do projeto.

Frequência Absoluta (n_j): número de poços com regime de funcionamento informado no cadastro de água subterrânea realizado ao longo do projeto.

Regime Médio Informado (R_{ej}) = Média de horas de funcionamento dos poços em cada intervalo de classe.

Regime médio ponderado em cada intervalo de classe: $(R_{ej} \times w_j)$.

Frequência Relativa ou fator de ponderação: $w_j = n_j / N$.

$$\bar{R}_e = \sum_{j=1}^{13} R_{ej} \times w_j$$

Regime Médio Estimado: **5 horas e 12 minutos.**

Como visto na Tabela 6.42 o regime médio de funcionamento estimado para os poços na área piloto equivale a aproximadamente 05 horas e 12 minutos.

Produção Global dos Poços

Considerando o regime de funcionamento e a vazão média dos diferentes intervalos de classe de vazão apresentados na Tabela 6.43, obtém-se uma produção estimada de 71.325 m³/dia (825,5 L/s) ou 26 hm³/ano.

Tabela 6.43 - Produção global estimada, explotada na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Classe Vazão (m ³ /h)	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Vazão Média (m ³ /h)	Efetivo de Poços	Vazão Estimada (m ³ /dia)	Vazão Estimada (m ³ /s)	
						731 poços	612 poços
0<x≤1	8	0,02	0,60	13	40,20	0,0005	0,0004
1<x≤2,5	22	0,05	1,68	35	307,10	0,0036	0,0030
2,5<x≤5	74	0,16	3,95	119	2435,07	0,0282	0,0236
5<x≤7,5	109	0,24	6,21	175	5638,52	0,0653	0,0547
7,5<x≤10	68	0,15	8,85	109	5013,92	0,0580	0,0486
10<x≤15	55	0,12	12,63	88	5788,33	0,0670	0,0561
15<x≤30	67	0,15	21,26	107	11872,29	0,1374	0,1150
x>30	53	0,12	91,08	85	40229,78	0,4656	0,3898
Total	456			731	71325,21	0,8255	0,6911

Legenda:

N = número total de poços com vazão informada

Frequência Absoluta (FA) = número de poços com vazão informada no em cada intervalo de classe.

Frequência Relativa (FR) = FA/N.

Vazão Média (QM) = média dos valores de vazão informada em cada intervalo de classe.

Efetivo de poços = N° P.P. x FR= número de poços produtores (bombeando/equipado) encontrados dentro dos limites do subdomínio.

Vazão Estimada (QE) m³/dia = QM x RME x Efetivo de poços em cada intervalo de classe.

Vazão Estimada (QE) m³/s = QE (m³/dia) x Quantidade de segundos em um dia (84.600).

A Tabela 6.44 apresenta a distribuição da produção global dos poços em condições de funcionamento de acordo com a situação operacional informada (ANEXO 2.4). Como visto na Tabela 6.43, a produção global de água estimada para os 731 poços atinge 0,8255 m³/s. Só com os 612 poços com vazão informada, a exploração extraía 84,72% desse total, ou seja, 0,6911 m³/s.

Tabela 6.44 - Distribuição dos poços em condições de funcionamento na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Poços	Em condições de funcionamento	Bombeando	Equipado
Número	731	251	480
Percentual	100%	34,3%	65,7%
Vazão (m³/s)	0,8255	0,283	0,542

A distribuição espacial da vazão dos poços localizados na Área Piloto da Bacia do Rio do Vieira é mostrada na Figura 6.54, a qual foi gerada a partir da tabela contida no ANEXO 2.4.

6.6.2 Zoneamento do Saldo Hídrico

Foram elaborados mapas de produção de água e de zoneamento do saldo hídrico seguindo a metodologia descrita a seguir.

O mapa de distribuição espacial da produção de água estimada a partir das vazões informadas é apresentado na Figura 6.55. Numa amostra de 612 poços, a vazão média por poço é de 21,18 m³/h, com desvio padrão de 41,28 m³/h. Esse desvio configura um coeficiente de variação de 195% que reflete a extrema variação que ocorre na produção dos poços, com um mínimo de 0,2 m³/h e um máximo de 360 m³/h, mas que é perfeitamente consistente com o comportamento previsto em terrenos cársticos.

O mapa de zoneamento do saldo hídrico foi elaborado dividindo a área de estudo com uma superfície 579,1 km² em 18 células quadradas, cada uma delas equivalente a uma área de aproximadamente 7,28 x 7,28 ≈ 53 km².

Sobre cada célula da malha regular foi realizado um balanço tendo como vazão de entrada, em cada célula, a recarga e como vazão de saída a produção global de água avaliada com base na vazão informada no cadastro de poços existentes em condições de funcionamento em cada célula. A quantidade de poços em condições de funcionamento (bombeando/equipado) corresponde a um total de 731 poços, em conjunto. exploram o equivalente a 0,8255 m³/s, o que equivale em média a 97,56 m³/dia para cada um. O resultado desse balanço é apresentado na Tabela 6.45.

Os saldos hídricos são apresentados no mapa de zoneamento da exploração, (a (Figura 6.56), mostrando que existe déficit hídrico significativo em 3 (três) células: C12 (0,196 m³/s), C11 (0,045 m³/s) e C15 (0,020 m³/s) totalizando 261 L/s para uma recarga de 79,2 mm/ano (item 6.6.2) equivalente a 224 m³/km².dia e na Tabela 6.45 estão destacadas em negrito.

Tabela 6.45 – Balanço entre a recarga e as retiradas de água através de poços em. exploração na área piloto de Montes Claros/MG.

Célula	x	y	Número de poços	Área km²	Recarga m³/d	Descarga m³/d	Saldo m³/dia	Saldo m³/s
1	-16,57	-43,90	3	29,1	6315	293	6.022	0,069699
2	-16,57	-43,83	9	28	6074	878	5.196	0,060139
3	-16,57	-43,77	2	3,8	833	195	638	0,007384
4	-16,63	-44,03	1	22,8	4956	98	4.858	0,056227
5	-16,63	-43,97	3	52	11293	293	11.000	0,127315
6	-16,63	-43,90	26	53	11491	2537	8.954	0,103634
7	-16,63	-43,83	25	51,6	11205	2439	8.766	0,101458
8	-16,63	-43,77	13	20,8	4517	1268	3.249	0,037604
9	-16,70	-44,03	3	20,3	4408	293	4.115	0,047627
10	-16,70	-43,97	3	47,6	10328	293	10.035	0,116146
11	-16,70	-43,90	158	53	11491	15414	-3.923	-0,04541
12	-16,70	-43,83	265	41,1	8925	25853	-16.928	-0,19593
13	-16,77	-43,97	3	30,5	6622	293	6.329	0,073252
14	-16,77	-43,90	107	53	11491	10439	1.052	0,012176
15	-16,77	-43,83	85	30,2	6557	8293	-1.736	-0,02009
16	-16,83	-43,97	1	1,4	307	98	209	0,002419
17	-16,83	-43,90	19	30,8	6688	1854	4.834	0,055949
18	-16,83	-43,83	5	10	2171	488	1.683	0,019479

Os aquíferos cársticos comportam-se geralmente como aquíferos livres em que as interações com o ciclo hidrológico são francas e rápidas. Essa condição propicia a reposição dos recursos renováveis, dentro de prazos curtos, facilitando, quase que, a imediata restituição das águas subterrâneas à rede hidrográfica, às fontes, brejos e exutórios em geral.

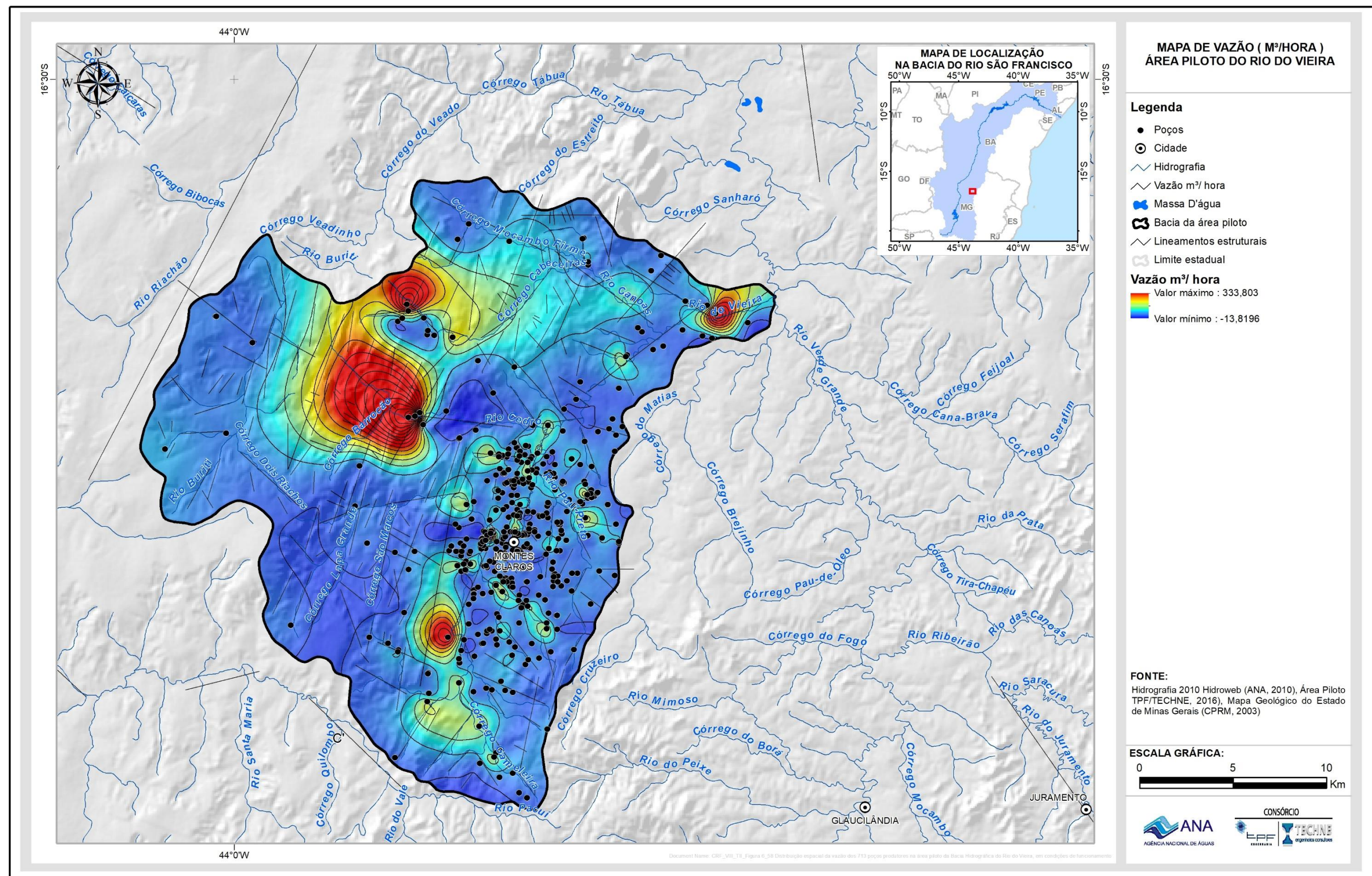


Figura 6.55: Distribuição espacial da vazão dos poços produtores na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira, em condições de funcionamento.

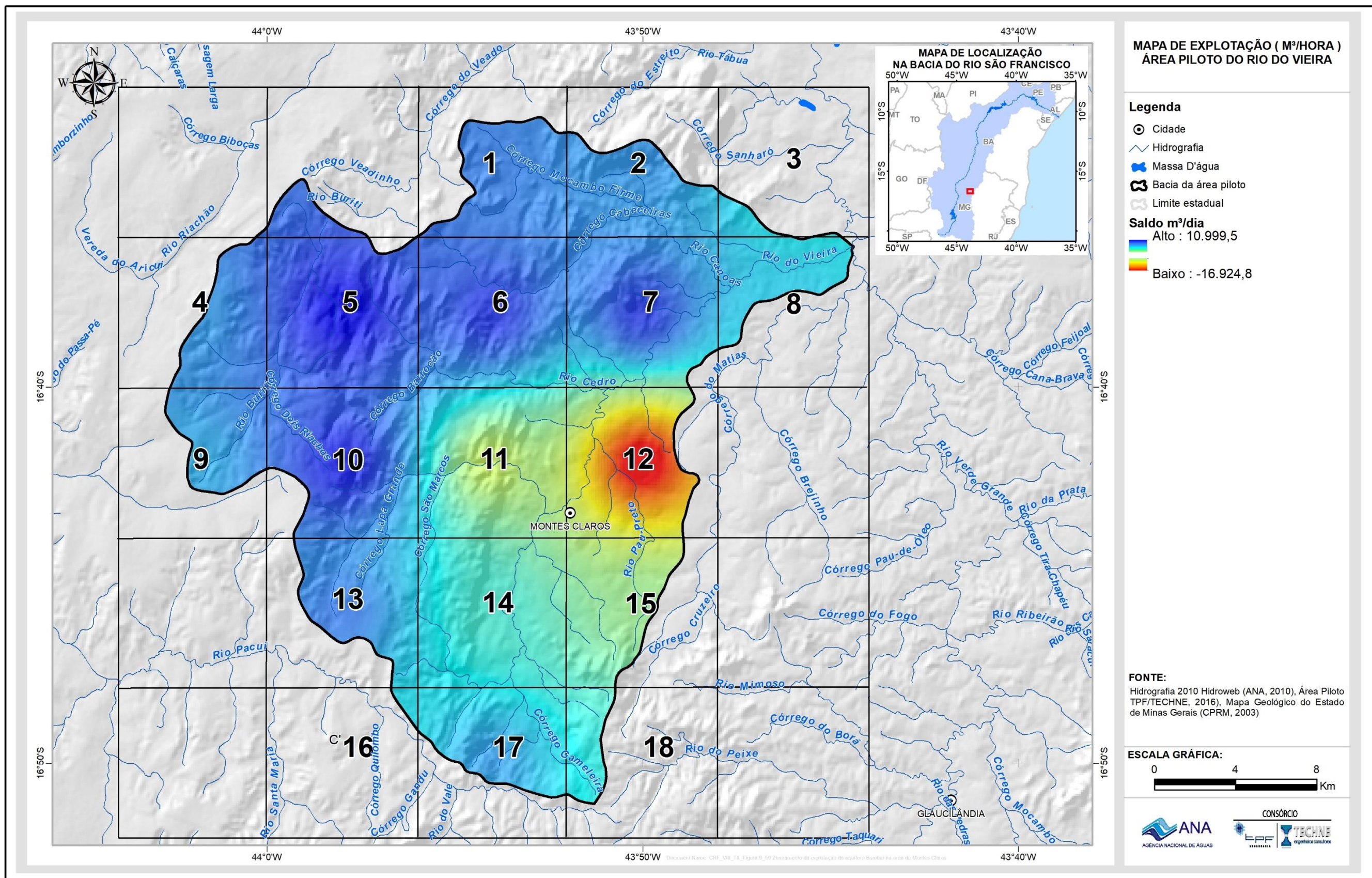


Figura 6.56: Zoneamento dos saldos hídricos do Sistema Aquífero Bambuí na área de Montes Claros.

7. HIDROQUÍMICA

7.1 Amostragem de Águas

Foram realizadas duas campanhas de amostragem de águas na bacia do Rio do Vieira em Montes Claros.

A primeira campanha foi realizada no período de 19 de Agosto a 11 de Setembro de 2014, representando o período seco da região. A segunda campanha foi realizada no período de 19 de Março a 04 de Maio de 2015, representando o período úmido da região. Em ambas as campanhas foram coletados 13 pontos de água subterrânea e um de surgência.

A amostragem contou da coleta de águas para a determinação de três grupos de parâmetros, os quais:

- **Físico-químicos:** sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, dureza, cor aparente, turbidez, amônia, nitrito, nitrato, ferro, manganês, cálcio, magnésio, potássio, sódio, alcalinidade total, bicarbonato, carbonato, cloreto, fluoreto, sulfato.
- **BTEX, Fenóis e 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** (43 compostos): abamectina, acefato, acetamiprido, azoxistrobina, boscalide, captana, carbenzadim + benomil, carbosulfano, cialotrina lmbda, ciflutrina (soma), cimoxanil, cipermetrina (soma), ciproconazol, ciromazina, clorantianiliprole, clorfenapir, clorotalonil, clorpirifós + clorpirifós-oxon, deltametrina, dibromofluorometano, difenoconalzo, dimetoato, diurom, famaxadona, fenitrotion, fenpropatrim, flumioxazim, glifosato + ampa, imidaclopride, iprodiona, linurom, metalaxil, p-bromofluorbenzeno, picoxistrobina, piraclostrobina, procimidona, tebuconazol, tetraconazol, tiabendazole, tiamentoxam, tiofanato metílico, triazofós, trifloxistrobina.

Na primeira campanha foram determinados apenas os parâmetros físico-químicos e na segunda campanha foram analisados todos os grupos supracitados, para alguns poços selecionados.

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 princípios agroquímicos empregados.

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

7.1.1 Rede de Amostragem

A localização e distribuição dos poços amostrados na área Bacia do Rio do Vieira podem ser visualizadas na Figura 7.1. A Tabela 7.1 apresenta os parâmetros analisados em cada ponto coletado.

Tabela 7.1 – Pontos coletados na bacia do Rio do Vieira e respectivos parâmetros analisados.

ID	Amostra	1º Campanha (período seco)	2º Campanha (período úmido)
C-043	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-044	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-045	Subterrânea	Físico-químicos	-
C-045A	Subterrânea	-	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-046	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-047	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-048	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-049	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-050	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-051	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-052	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais.
C-053	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, Agroquímicos, BTEX, fenóis e metais.
CS-056	Superficial	Físico-químicos	Físico-químicos.
C-057	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, Agroquímicos, BTEX, fenóis e metais.
C-084	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos.

7.1.2 Procedimentos de Coleta

Nos casos em que as bombas dos poços se encontravam desligadas no momento da coleta, procedeu-se o acionamento por aproximadamente 30 minutos antes de coletar, 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.

No momento da coleta das amostras foram medidos parâmetros *in situ* mediante o uso de sondas específicas, conforme **Tabela 7.2** e **Figuras 7.2 a 7.6**.

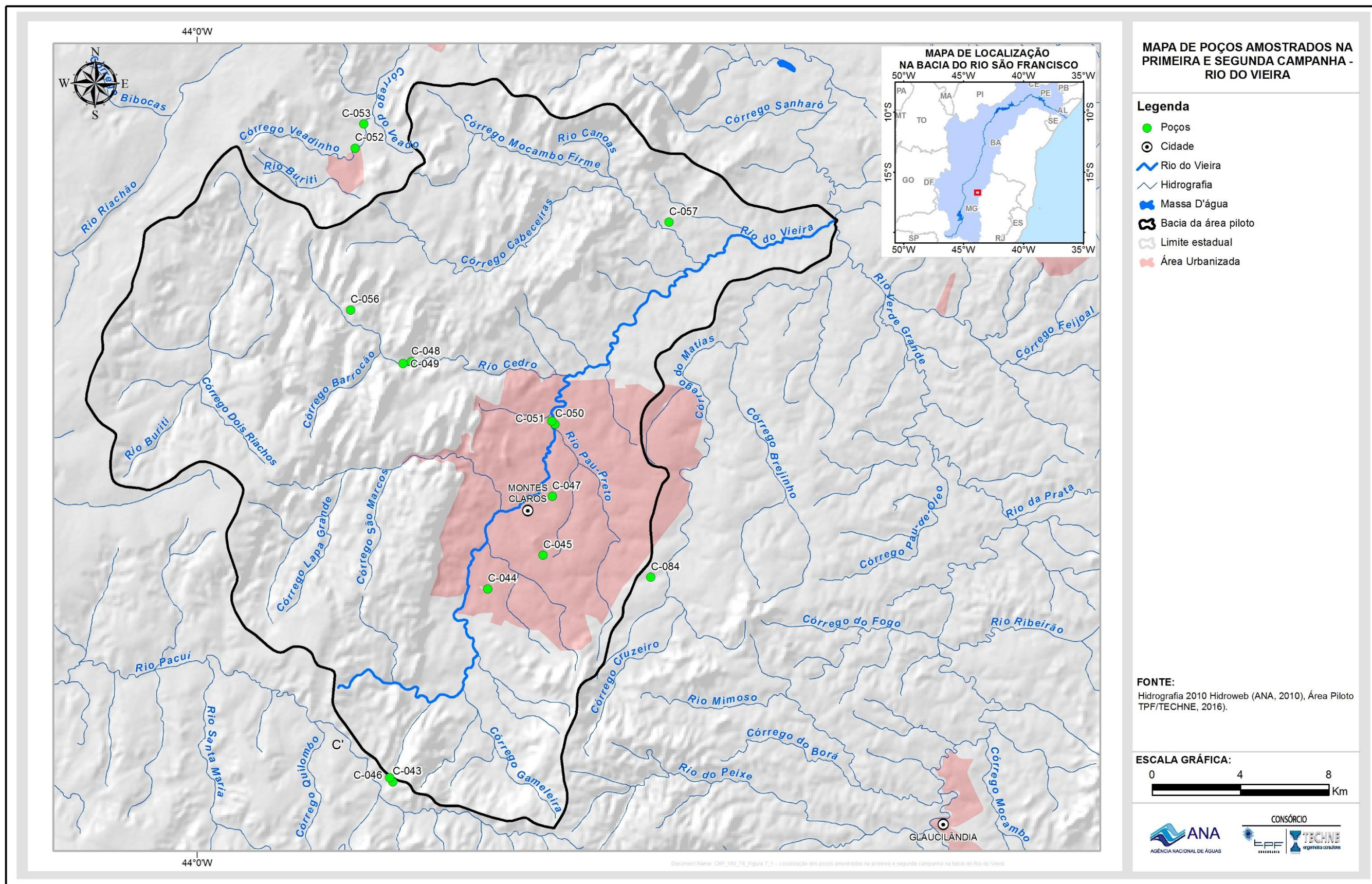


Figura 7.1 – Localização dos poços amostrados na primeira e segunda campanha na bacia do Rio do Vieira.

Tabela 7.2 - 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 oxi-redução (ORP), mV	HANNA - HI3230B



Figura 7.2 - Sonda e eletrodos para determinação da temperatura, pH e ORP.

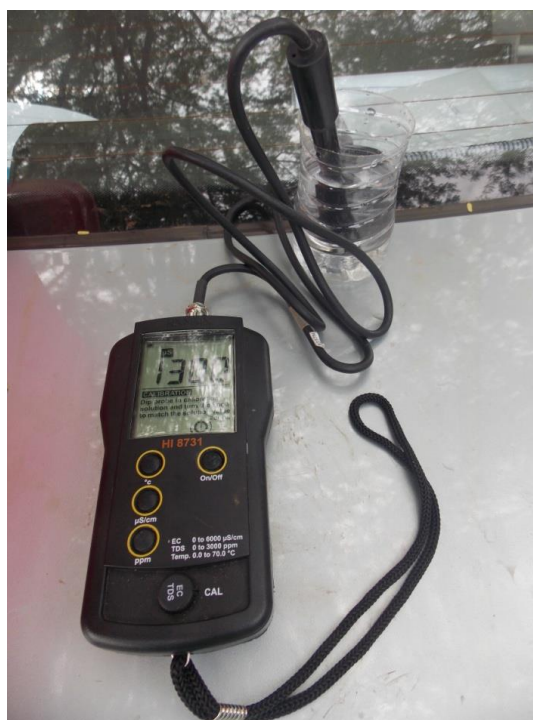


Figura 7.3 - Leitura dos parâmetros condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.



Figura 7.4 - Inserção do eletrodo para leitura dos parâmetros in situ.



Figura 7.5 – Logística de campo envolvendo a medição e anotação dos parâmetros medidos in situ, na surgência do Rebentão dos Ferros (C-056)

Os frascos utilizados na coleta das águas foram fornecidos pelo laboratório. Imediatamente após a coleta eles foram acondicionados em caixas térmicas com gelo (**Figura 7.6**) e encaminhados por via aerea ou terrestre ao laboratório de forma que a sua determinação desse início em até 24 horas após a coleta.



Figura 7.6 – Caixa térmica com gelo para acondicionamento e envio das amostras para o laboratório.

7.1.3 Métodos de Análise

As amostras de águas foram determinadas em laboratórios da Bioagri Ambiental. A **Tabela 7.3** apresenta método, metodologia e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros determinados.

Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise (APHA/AWWA/WEF, 2005).

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

Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise (APHA/AWWA/WEF, 2005) – Continuação.

ID Método	Parâmetros	Limite	Unidade	Preservante + Frasco (todos refrigerados)	Tempo para Análise
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 vias 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

7.2 Caracterização das Águas

7.2.1 Avaliação da distribuição dos dados físico-químicos e químicos

Com o objetivo de avaliar a distribuição dos dados físico-químicos e químicos foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, através do programa Statistica versão 7.1, para todas as variáveis, separadas por período de coleta.

O teste de Kolmogorov-Smirnov compara a função de distribuição acumulada do universo amostral com a distribuição esperada caso os dados tivessem uma distribuição normal. Se existir uma diferença significativa, o teste rejeita a hipótese nula da normalidade populacional.

Foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para a maioria dos parâmetros analisados nas amostras de água coletadas em poços na área da bacia do Rio do Vieira, nos dois períodos de amostragem. A **Tabela 7.4** apresenta uma síntese dos resultados no período seco.

Tabela 7.4 – Resultados de p valor para os testes de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov, nas amostras de água coletadas na bacia do Rio do Vieira no período seco.

Variáveis	Período Seco		
	N	p value	NORMAL
pH	14	> 0,20	Sim
Temperatura (°C)	14	> 0,20	Sim
CE (µS/cm)	14	> 0,20	Sim
STD (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Dureza (mg/L CaCO ₃)	14	<0,20	Não
Cálcio (mg/L)	14	< 0,15	Não
Magnésio (mg/L)	14	>0,20	Sim
Sódio (mg/L)	14	< 0,20	Não
Potássio (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Bicarbonato (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Sulfato (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Cloreto (mg/L)	14	< 0,10	Não
Fluoreto (mg/L)	14	< 0,15	Não
Nitrato (mg/L N)	14	<0,10	Não
Ferro (mg/L)	14	< 0,20	Não
Manganês (mg/L)	14	< 0,15	Não

Os testes de Kolmogorov-Smirnov indicaram uma distribuição normal ou próximo de normal para o pH, Temperatura, CE, STD, magnésio, potássio, bicarbonato e sulfato. Tiveram distribuição considerada não-normal, as variáveis: dureza, cálcio, sódio, cloreto, fluoreto, nitrato, ferro e manganês.

Para entender e reforçar a distribuição dos resultados e da tendência para normalidade foram construídos gráficos de probabilidade para as variáveis estudadas. Alguns exemplos ilustrativos serão apresentados a seguir.

O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os dados de pH (**Figura 7.7**), no período seco, indica uma distribuição normal tanto na análise de gráfico com na distribuição relativamente contínua e próxima a linha de normalidade. A figura mostra que 04 amostras (cerca de 25% do universo amostral) registram pH inferiores a 7.

Os resultados de CE distribuídos no gráfico de probabilidade da **Figura 7.8** mostram que a maioria das amostras se posiciona próxima da linha de normalidade. Os casos mais afastados dessa linha correspondem às três amostras com teores mais baixos. Essa tendência de distribuição próxima à normalidade reforça o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.4**.

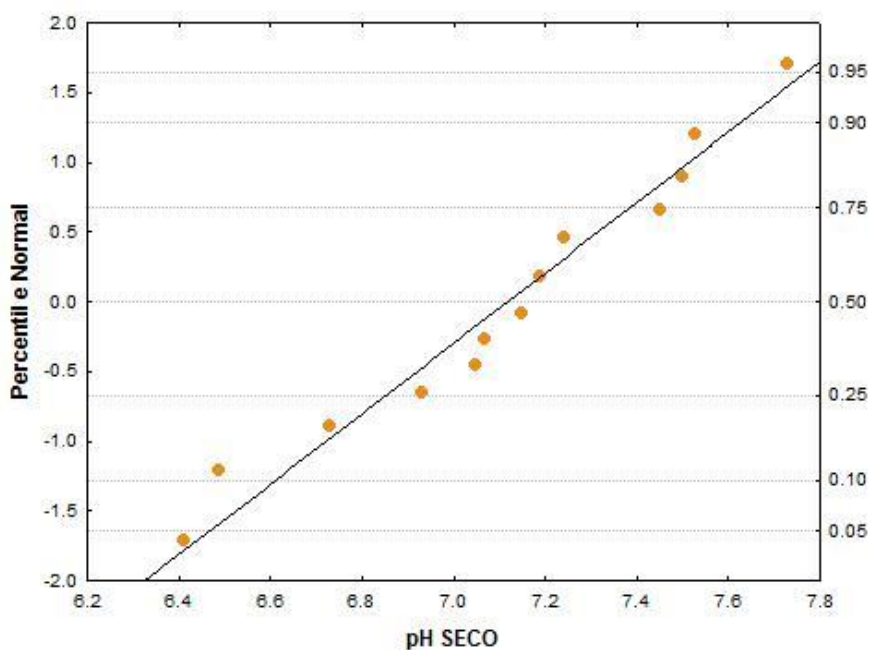


Figura 7.7 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.

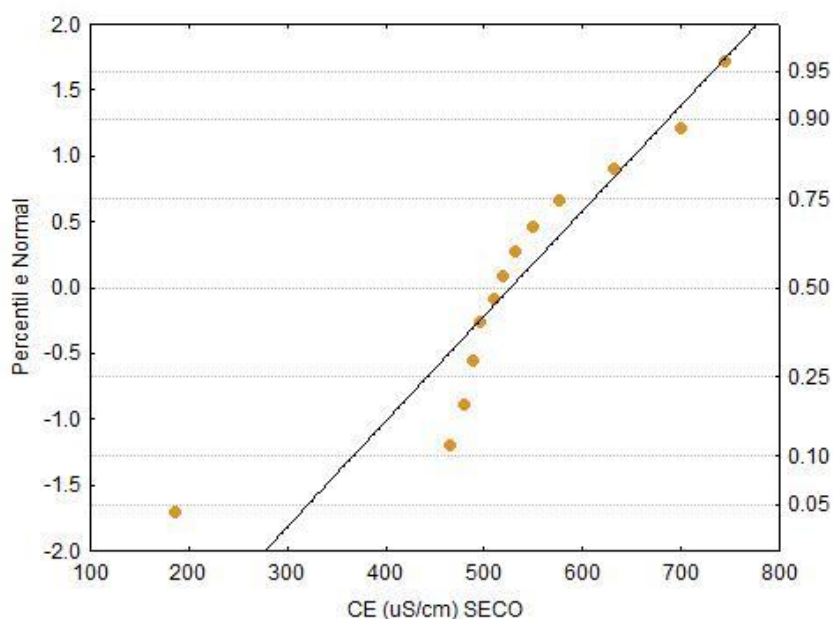


Figura 7.8 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de CE (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

Os resultados de sódio, distribuídos no gráfico de probabilidade da **Figura 7.9**, mostram um relativo afastamento em relação a linha de normalidade. Os resultados de sódio apresentam alguns agrupamentos de resultados próximos ou similares, que geram um escalonamento e justificam a separação da curva de normalidade. Existe ainda o valor máximo de 64,50 mg/L, tipicamente *outlier* e que, por isso, se encontra afastado da linha da normalidade. Por essas características, o sódio apresenta uma distribuição relativamente afastada da normalidade, explicando o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.4**.

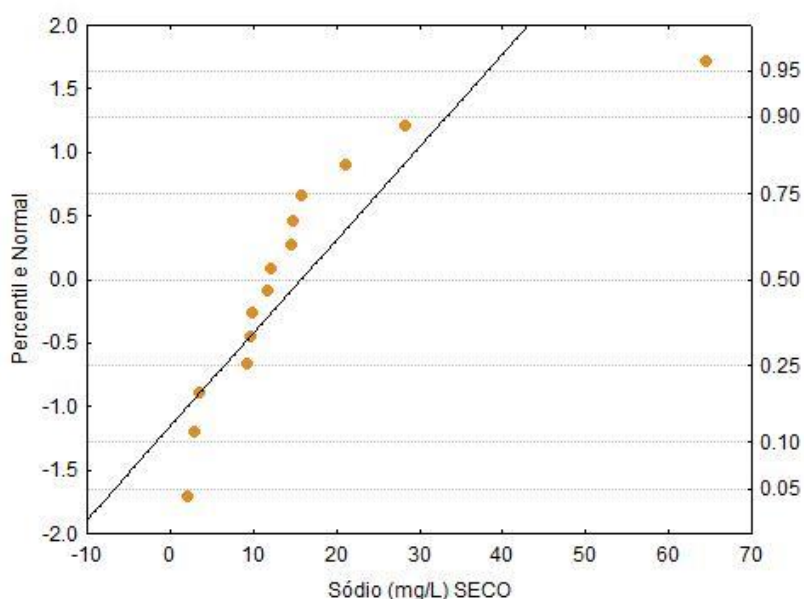


Figura 7.9 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de sódio (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

Os resultados de cloreto, distribuídos no gráfico de probabilidade da **Figura 7.10**, mostram um relativo afastamento em relação à linha de normalidade, perceptível especialmente para as amostras com teores mais baixos. Nota-se que cerca de 70% dos resultados de cloreto são baixos e relativamente similares, levando a uma distribuição discordante da linha da normalidade. Esse comportamento na distribuição dos resultados de cloreto justifica o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.4**.

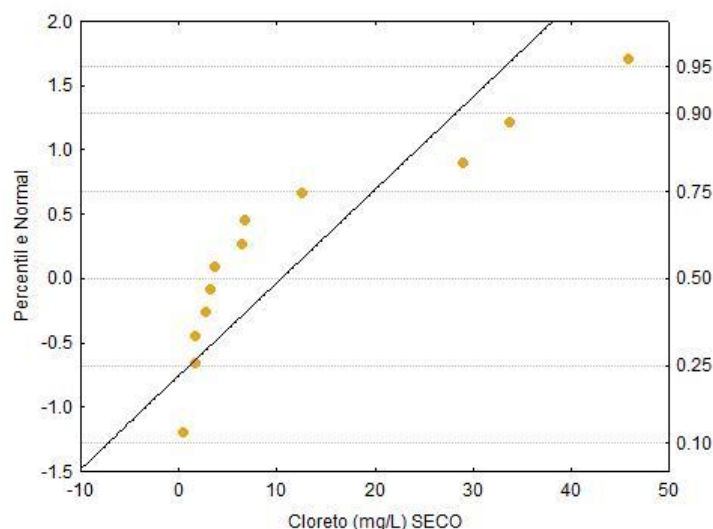


Figura 7.10 – Teste de Kolmogorov-Smirnov de cloreto (período seco). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

A **Tabela 7.5** apresenta uma síntese dos resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para as amostras do Rio do Vieira coletadas no período úmido.

Os testes de Kolmogorov-Smirnov indicaram uma distribuição normal ou próximo de normal para pH, temperatura, CE, ORP, STD, dureza, cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, cloreto e fluoreto. Tiveram distribuição considerada não-normal, as variáveis sulfato, nitrato, ferro e manganês.

Para entender e reforçar a distribuição dos resultados e normalidade foram construídos gráficos de probabilidade para as variáveis estudadas. Alguns exemplos ilustrativos serão apresentados a seguir.

Os resultados de pH no período úmido plotados no gráfico da **Figura 7.11** revela uma distribuição muito próxima a linha de normalidade, confirmando o resultado do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.5**.

Tabela 7.5 – Resultados de p valor para os testes de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov, nas amostras de água coletadas na bacia do Rio do Vieira no período úmido.

Variáveis	Período Úmido		
	N	<i>p value</i>	NORMAL
pH	14	> 0,20	Sim
Temperatura (°C)	14	> 0,20	Sim
CE (µS/cm)	14	> 0,20	Sim
STD (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Dureza (mg/L CaCO ₃)	14	> 0,20	Sim
Cálcio (mg/L)	14	>0,15	Sim
Magnésio (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Sódio (mg/L)	14	>0,20	Sim
Potássio (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Bicarbonato (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Sulfato (mg/L)	14	< 0,15	Não
Cloreto (mg/L)	14	>0,20	Sim
Fluoreto (mg/L)	14	>0,20	Sim
Nitrato (mg/L N)	14	< 0,05	Não
Ferro (mg/L)	14	< 0,15	Não
Manganês (mg/L)	14	< 0,10	Não

Os resultados de CE, no período úmido, distribuídos no gráfico de probabilidade da **Figura 7.7** mostram que a maioria das amostras se posiciona muito próxima da linha de normalidade, com poucos casos de desvios. Essa tendência de distribuição próxima à normalidade reforça o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.5**.

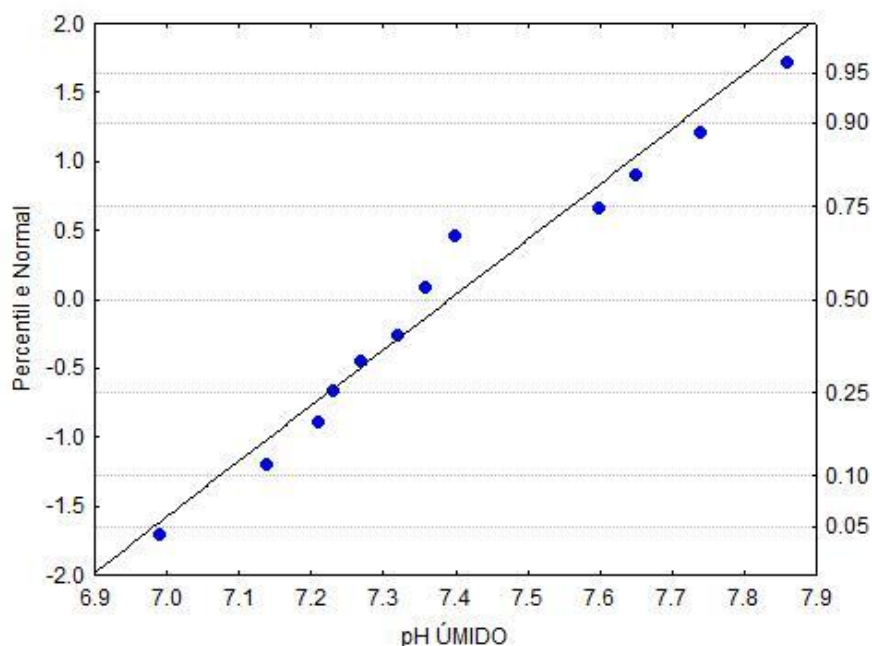


Figura 7.11 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

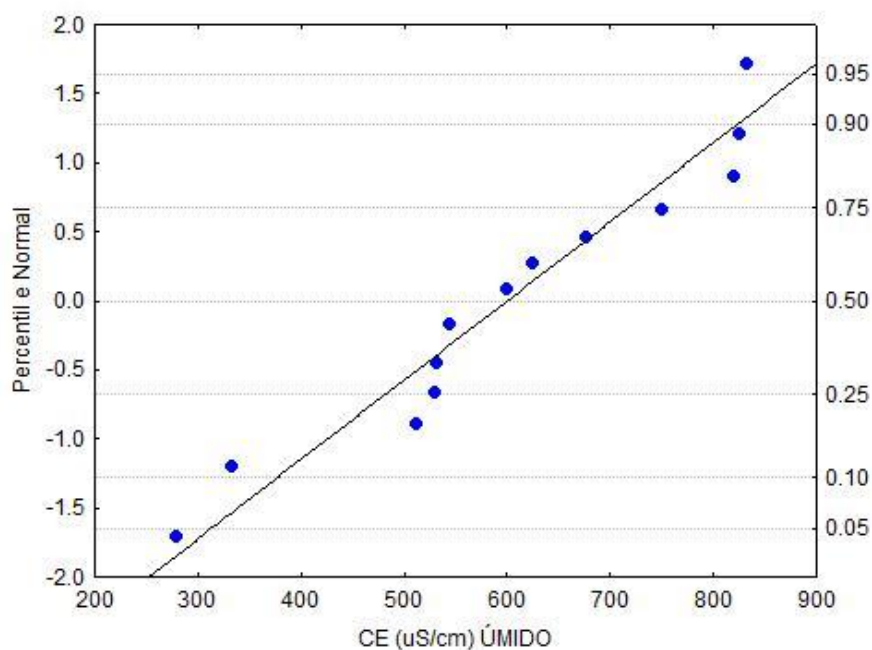


Figura 7.12 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

Os resultados de sódio, distribuídos no gráfico de probabilidade da **Figura 7.13**, mostram que a maioria das amostras se posiciona muito próxima da linha de normalidade. Essa distribuição justifica o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.B**.

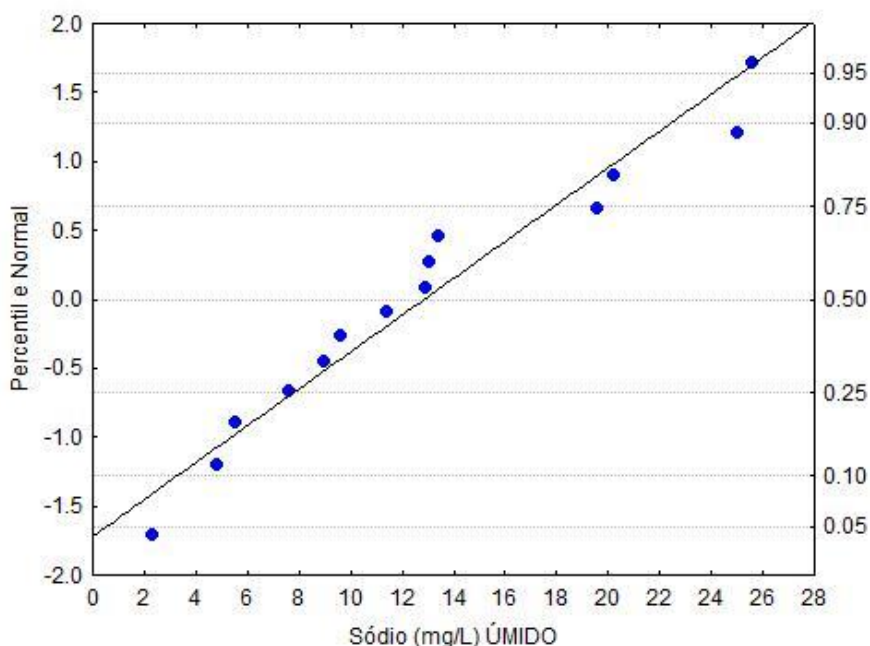


Figura 7.13 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de sódio (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

A distribuição de sódio no período úmido, situada próximo anormalidade difere do período seco que mostrou uma distribuição um pouco afastada da linha de normalidade e que por isso foi considerado “não normal” no teste de Kolmogorov-Smirnov. No período seco, uma amostra *outlier* contribuiu fortemente para a não normalidade da curva. Esse exercício mostra que além do teste de normalidade propriamente dito é importante a análise de gráficos de distribuição para o entendimento dos comportamentos das variáveis.

Os resultados de cloreto, no gráfico de probabilidade da **Figura 7.14**, mostram que uma distribuição relativamente próxima à linha de normalidade. Essa distribuição justifica o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na **Tabela 7.5**. Os resultados no período seco têm uma distribuição relativamente similar ao do úmido, mas mostra um desvio um pouco maior da linha de normalidade o que leva a uma classificação de “não normal” no teste de Kolmogorov-Smirnov. Novamente fica registrada a importância da análise de gráficos de distribuição para o entendimento dos comportamentos das variáveis.

Os resultados de sulfato no gráfico de probabilidade da **Figura 7.15** é um exemplo de uma distribuição afastada da linha de normalidade e que é consistente com o resultado de “não normal” do teste de Kolmogorov-Smirnov da **Tabela 7.5**.

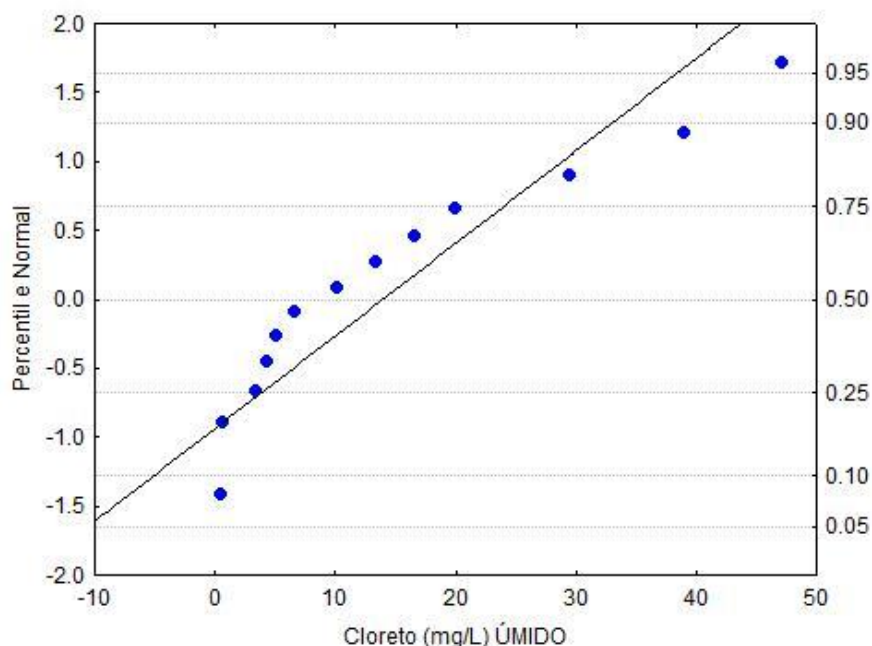


Figura 7.14 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de cloreto (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

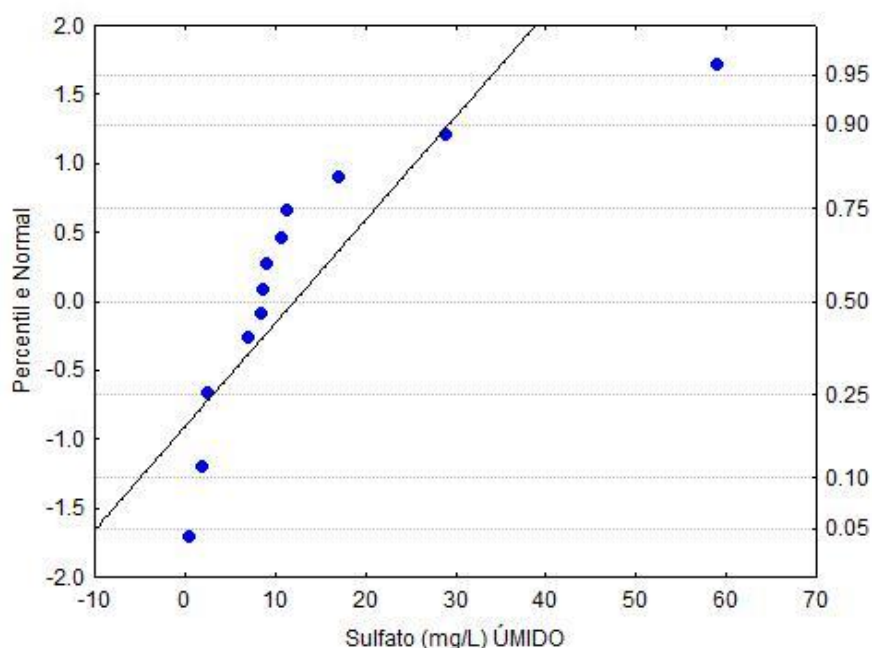


Figura 7.15 – Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de sulfato (período úmido). Escala vertical esquerda (valor normal esperado) e escala vertical direita (valores de percentil).

O teste de Kolmogorov-Smirnov evidenciou que uma parte representativa das variáveis mostra relativamente próxima a distribuição normal. A não normalidade dos dados para algumas variáveis deve-se ao domínio de valores baixos (inferiores ou próximos ao LD), e, conseqüentemente, os testes paramétricos ou não paramétricos não geram respostas consistentes.

7.2.2 Avaliação do efeito sazonal na hidroquímica

Para avaliar a contribuição das condições climáticas na qualidade natural das águas da bacia do Rio do Vieira foram elaborados os gráficos das **Figuras 7.16** a **7.28**. Nos referidos gráficos constam as amostras dos 13 poços e uma amostra superficial da surgência do Rebentão dos Ferros. Da análise dos gráficos, se observa que o efeito sazonal não se reflete na hidroquímica da maioria das amostras avaliadas, na medida em que os resultados analíticos tendem a se posicionar na linha de igual valor ou formando uma nuvem próxima dela.

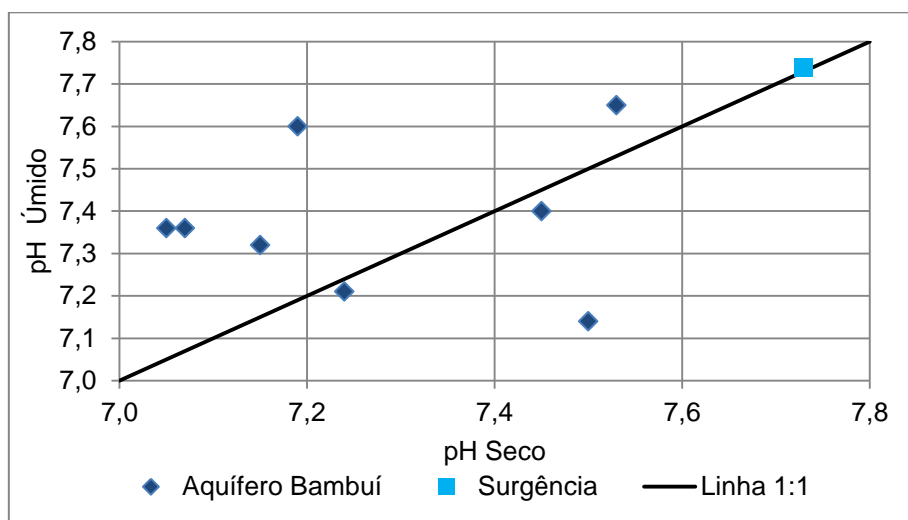


Figura 7.16 – Comparação dos resultados de pH obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

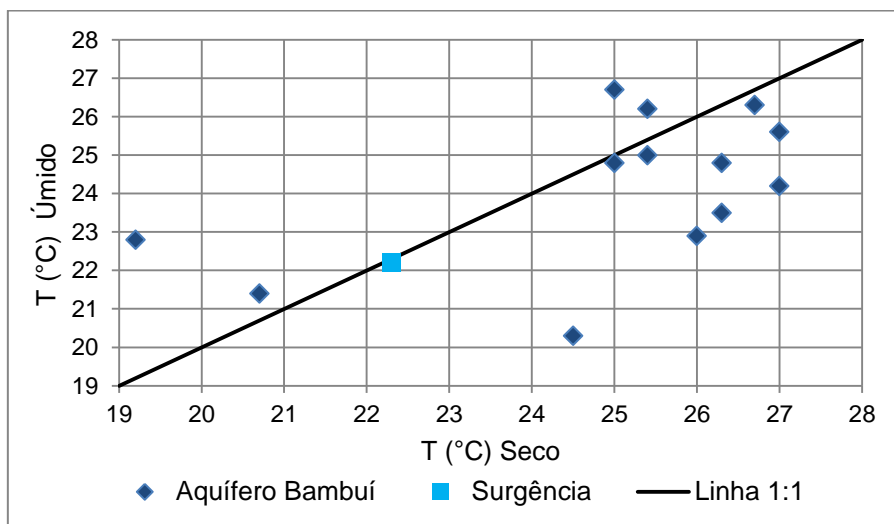


Figura 7.17 – Comparação dos resultados de temperatura (°C) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

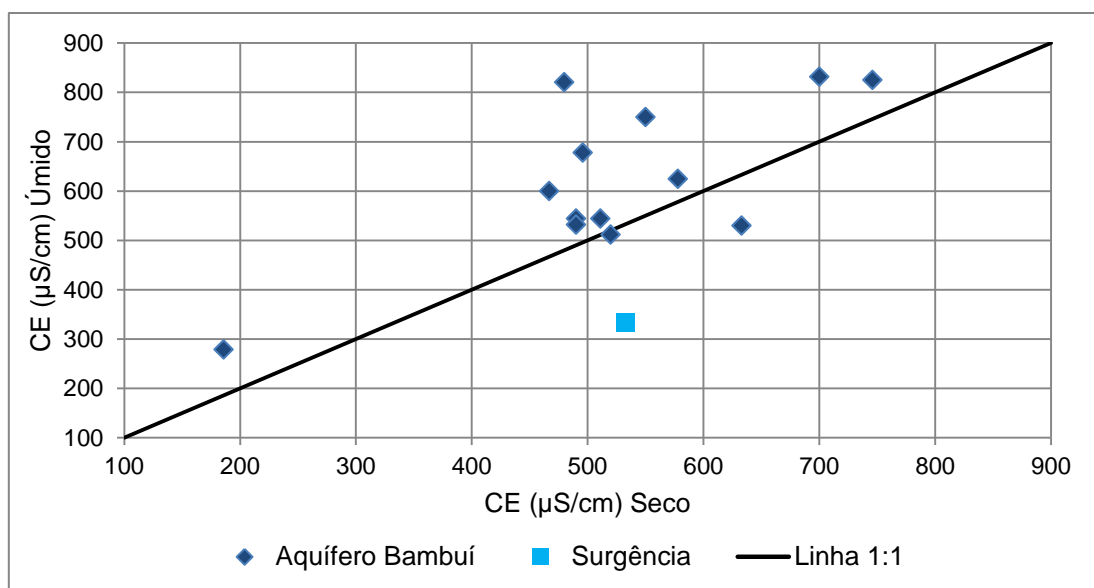


Figura 7.18 – Comparação dos resultados de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

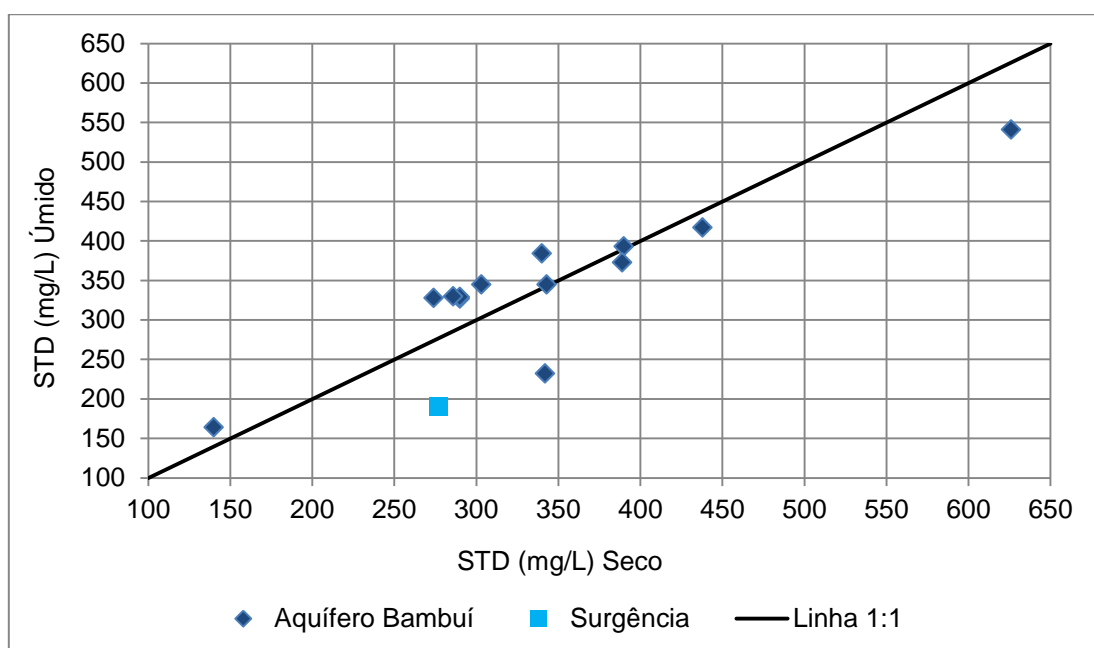


Figura 7.19 – Comparação dos resultados de STD (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

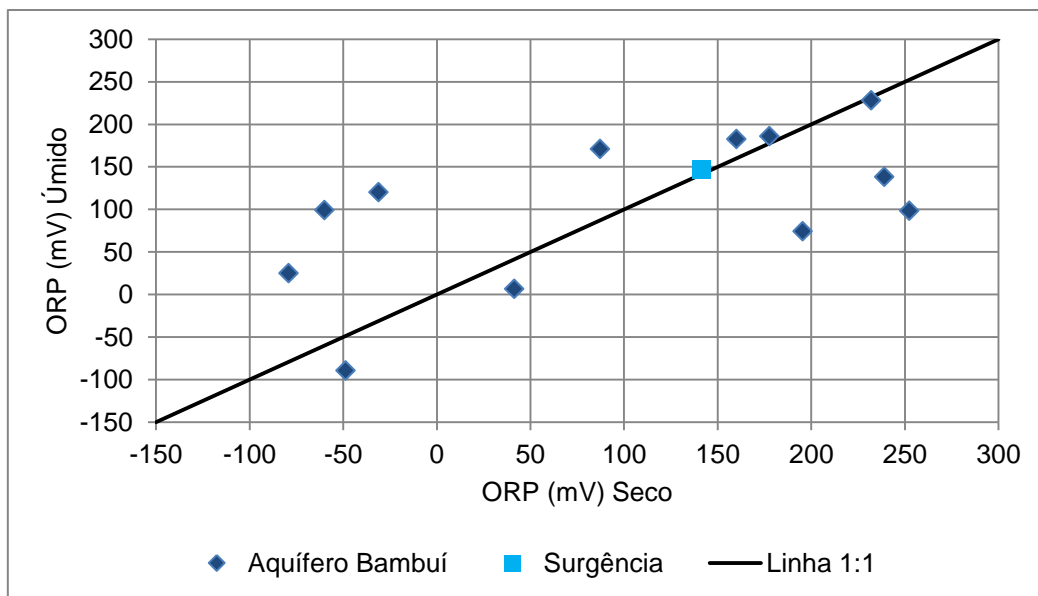


Figura 7.20 – Comparação dos resultados de ORP (mV) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.

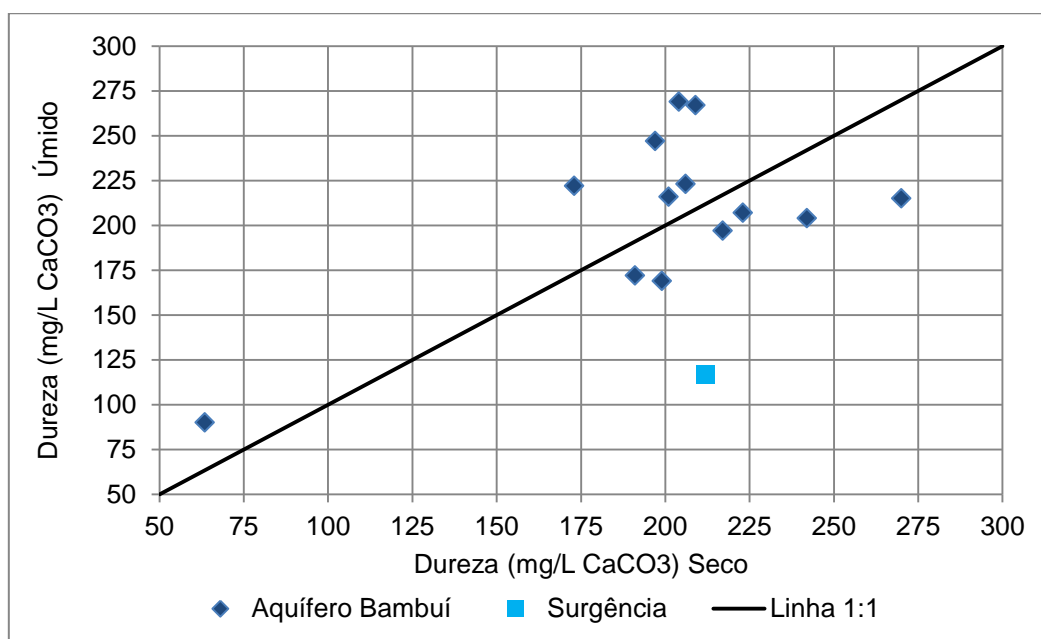


Figura 7.21 – Comparação dos resultados de dureza (mg/L como CaCO₃) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Rio do Vieira.

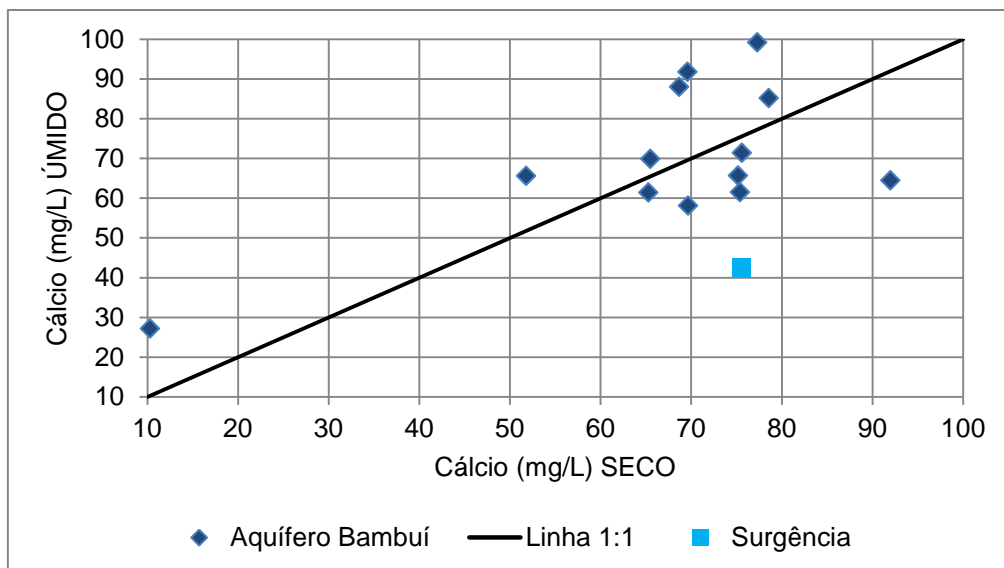


Figura 7.22 – Comparação dos resultados de cálcio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

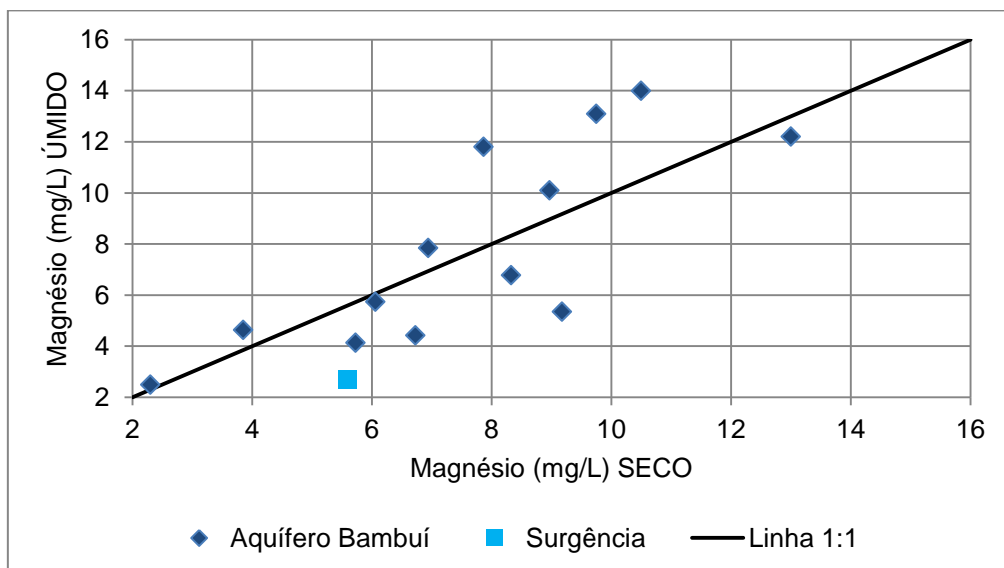


Figura 7.23 – Comparação dos resultados de magnésio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

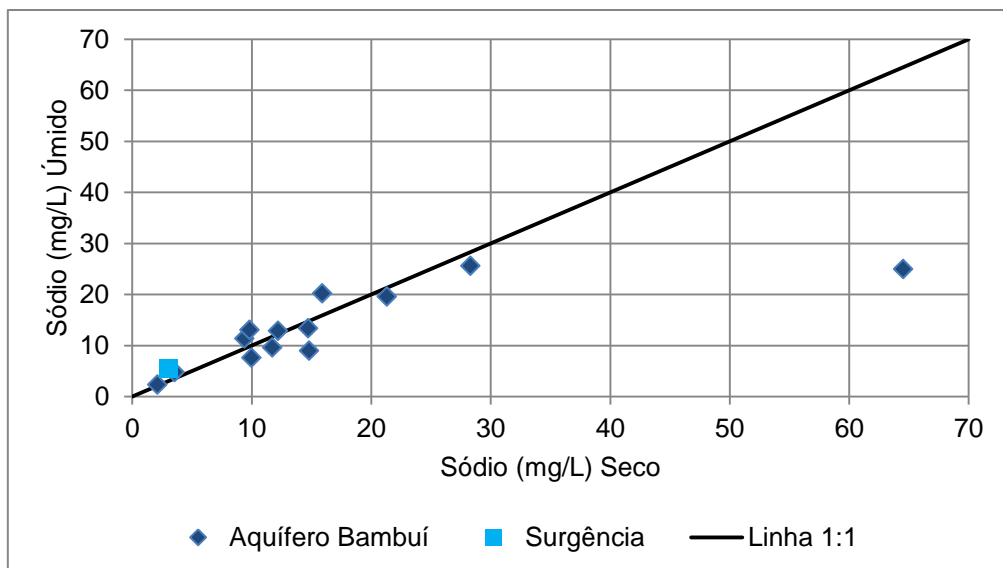


Figura 7.24 – Comparação dos resultados de sódio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

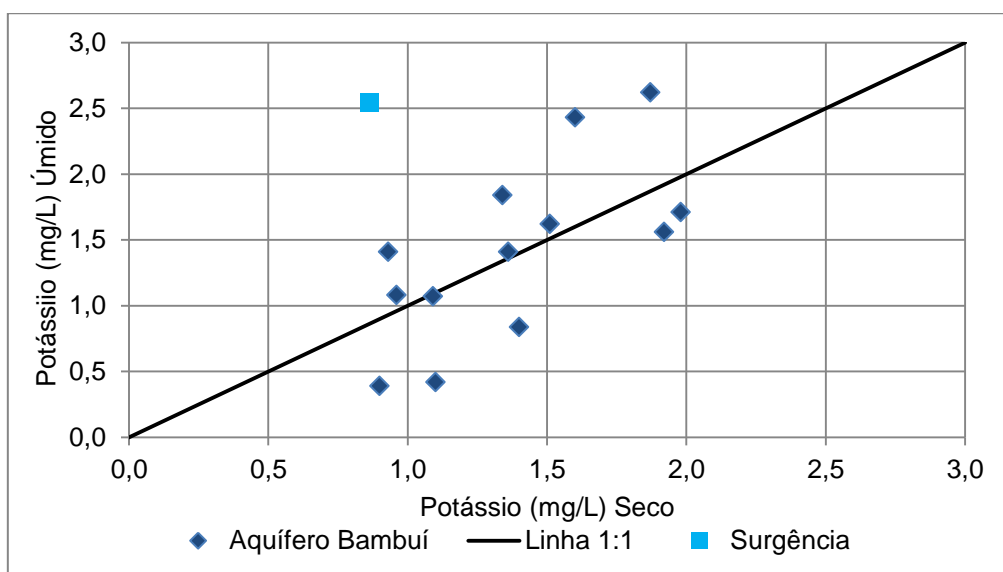


Figura 7.25 – Comparação dos resultados de potássio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

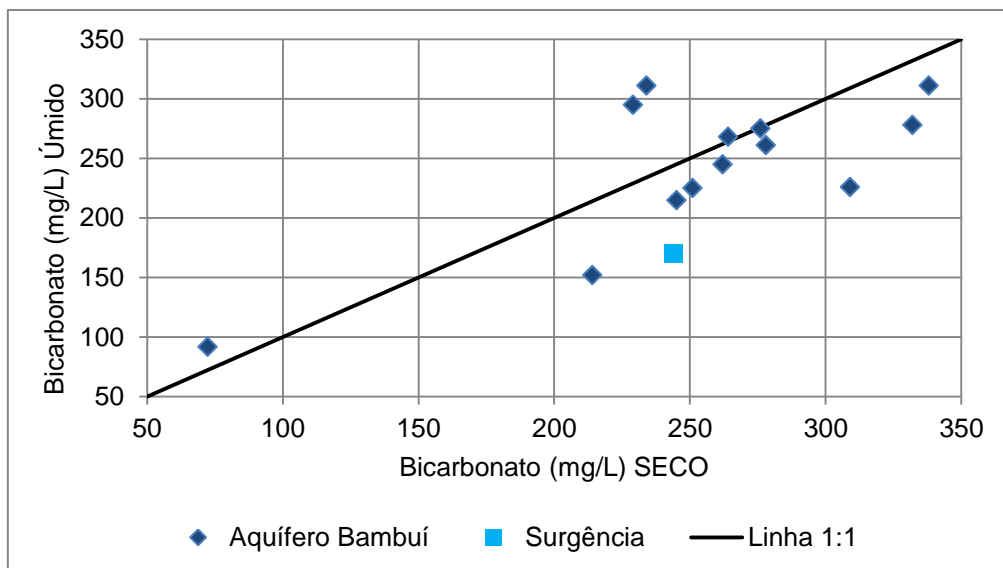


Figura 7.26 – Comparação dos resultados de bicarbonato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

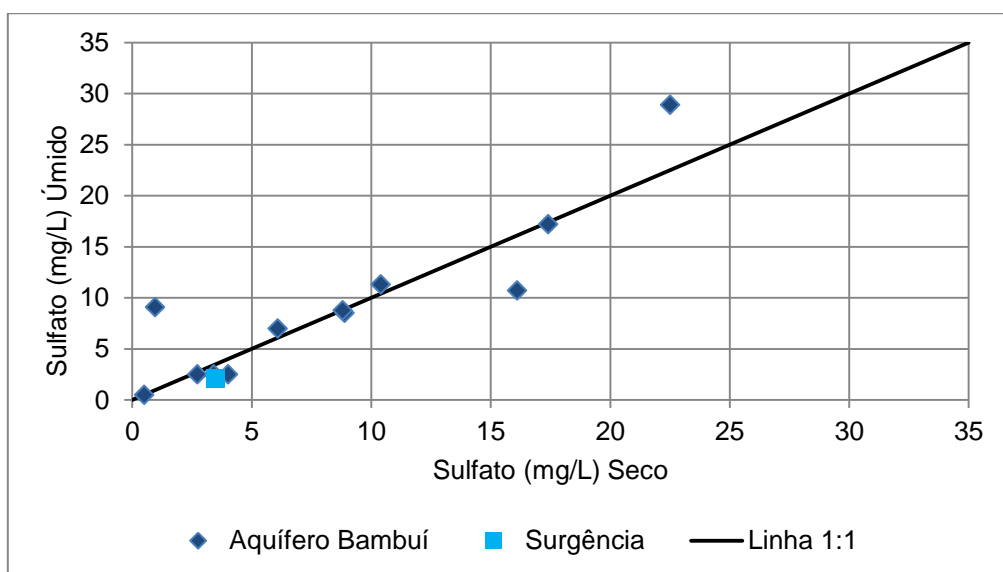


Figura 7.27 – Comparação dos resultados de sulfato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

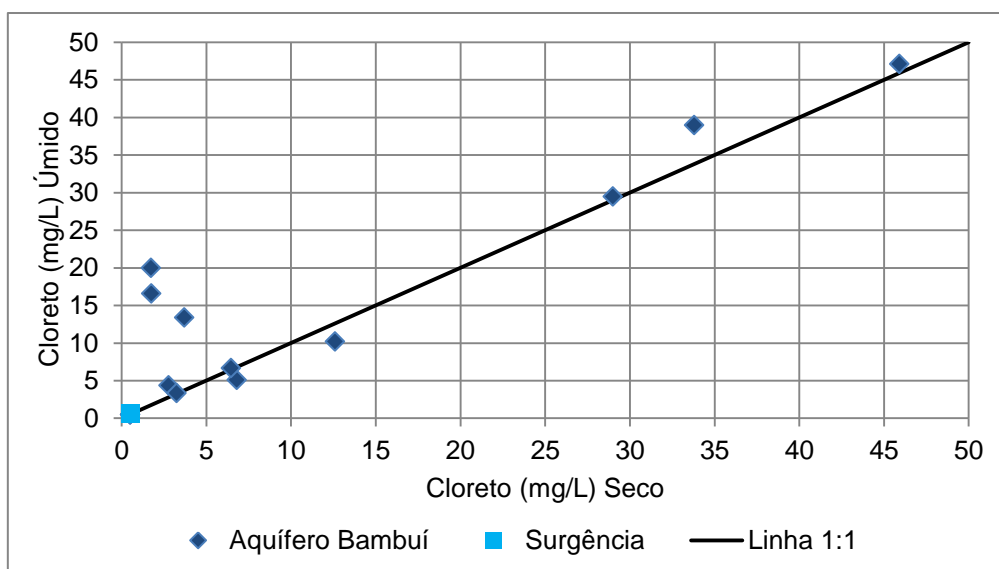


Figura 7.28 – Comparação dos resultados de cloreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Rio do Vieira.

7.3 Avaliação Hidrogeoquímica

Na avaliação hidrogeoquímica das águas subterrâneas da bacia do Rio do Vieira, optou-se por agrupar os poços de acordo com aspectos geológicos, estruturais, de carstificação, topográficos/geomorfológicos, de gradiente hidráulico e, também, por critérios ambientais e do uso e ocupação do solo onde estão situados. As **Figuras 7.29 a 7.33** apresentam as localizações das amostras e sua separação em dois grupos com base nos vários aspectos levantados. No Grupo 1 estão as amostras dos poços C-043, C-046, C-048, C-049, C-052, C-053, C-057 e C-056 (surgência) e no Grupo 2 as amostras dos poços C-044, C-045, C-045A, C-047, C-050, C-051 e C-084

É importante destacar que o agrupamento tem por finalidade verificar as influências dos aspectos naturais sobre a qualidade dessas águas, sem desconsiderar, no entanto, os aspectos antrópicos. Nesse sentido, foram individualizados dois grupos de amostras, que foram caracterizados conforme os aspectos considerados.

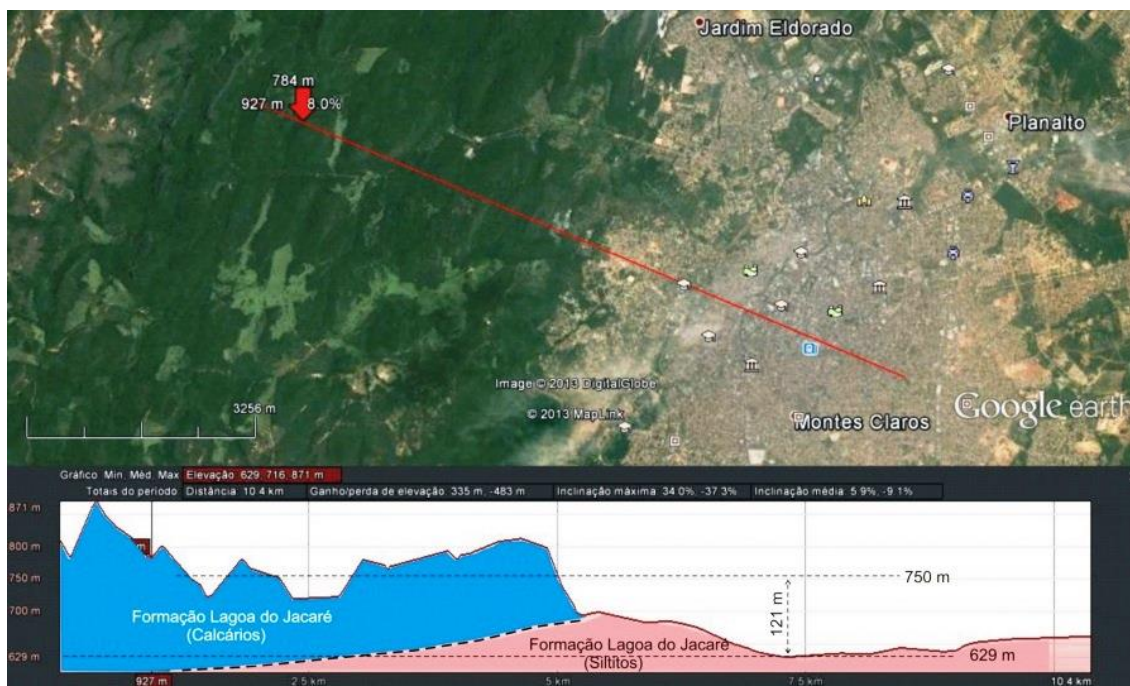


Figura 7.30 - Aspectos geomorfológicos e geológicos: poços do Grupo 1, localizados na faixa oeste (Formação Lagoa do Jacaré - calcários), com altitude média é 750 m e poços do Grupo 2, localizados na faixa leste (Formação Lagoa do Jacaré - siltitos) com altitude média de 629 m.

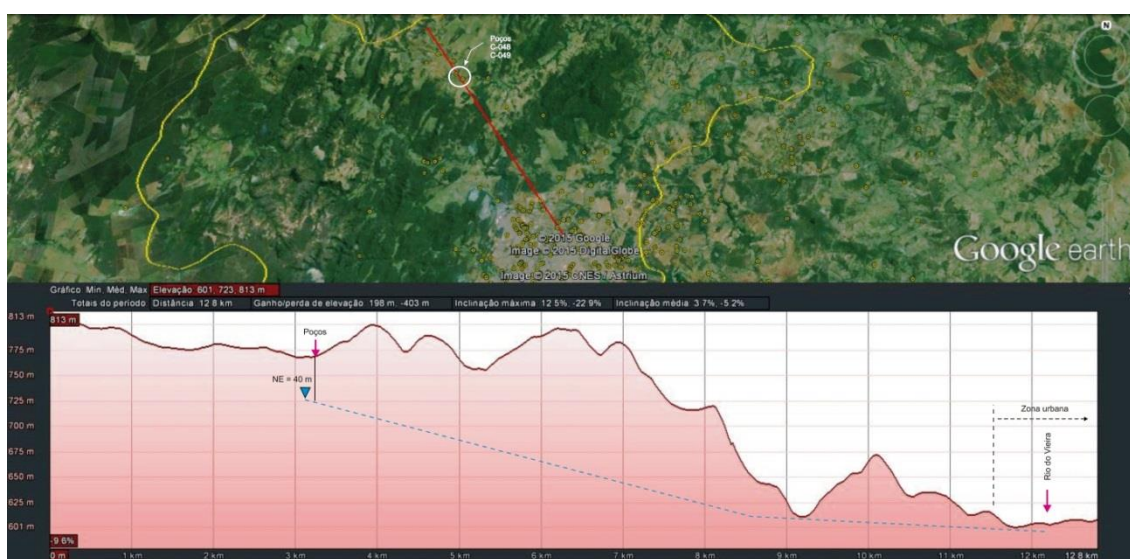


Figura 7.31 - Aspectos baseados na diferença de gradiente hidráulico: poços do Grupo 1 estão localizados na faixa oeste, cujo gradiente hidráulico é maior quando comparado aos poços do Grupo 2 localizados na faixa leste.

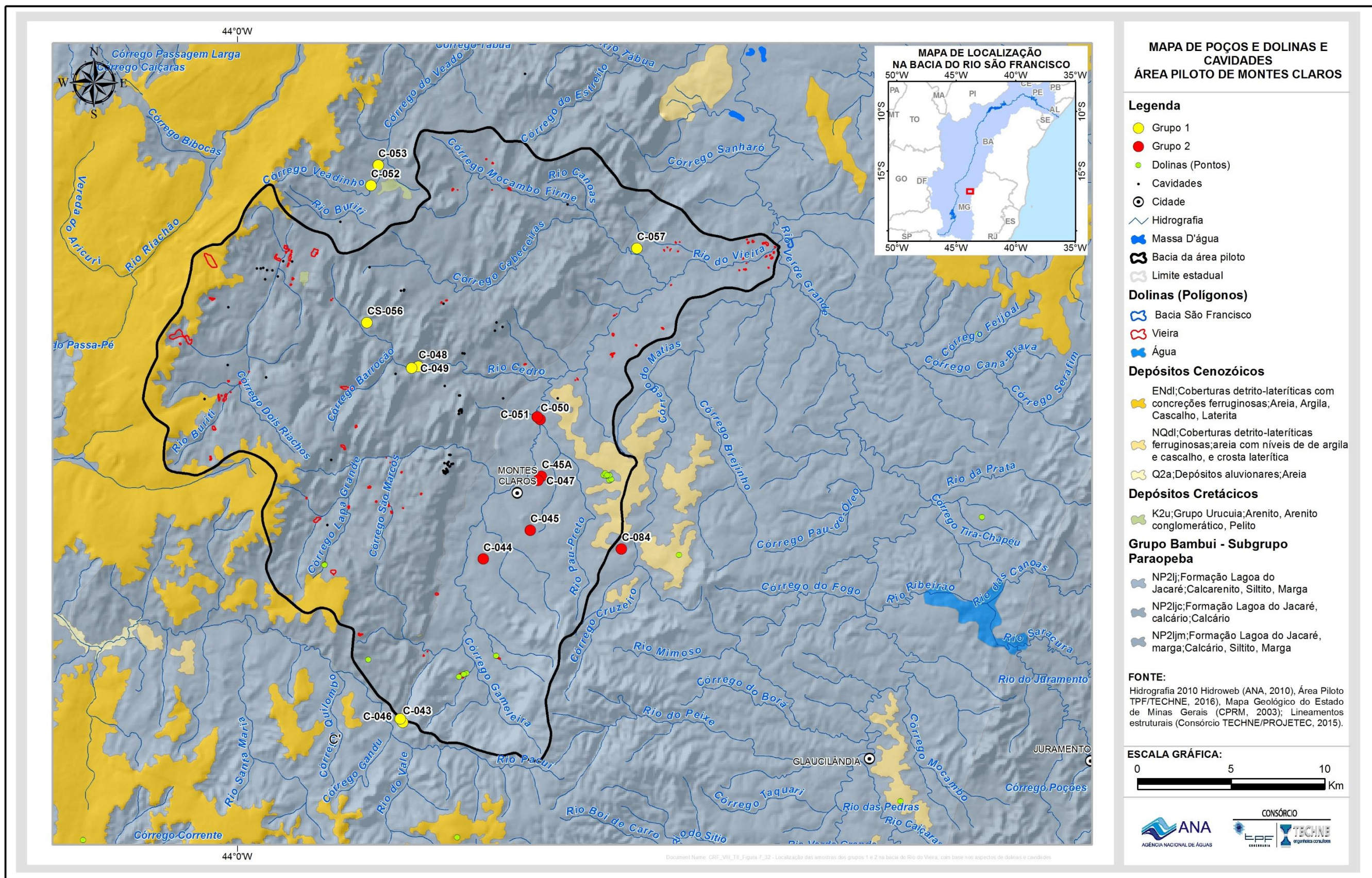


Figura 7.32 - Localização das amostras dos grupos 1 e 2 na bacia do Rio do Vieira, com base nos aspectos de dolinas e cavidades.

Grupo 1:

As porções oeste, sul e norte da área piloto da bacia do Rio do Vieira estão caracterizados por constarem de setores minimamente afetados por fatores antrópicos, isto é, onde predominam as atividades humanas dispersas ou mesmo inexistem (**Figura 7.33**). É nesse setor que se encontra o Parque Estadual da Lapa Grande, que ocupa uma parte expressiva da área.

Do ponto de vista estrutural, são nessas porções da área piloto da bacia do Rio do Vieira, que estão concentrados as zonas de falhas, bem evidenciadas, principalmente nas direções NNE/SSW e NW/SE (**Figura 7.29**). Nessas zonas de falhas estão presentes as maiores exposições de dolinas, conforme mostra a **Figura 7.32**.

Em relação aos aspectos geomorfológico e geológico, a Formação Lagoa do Jacaré, ocorrem na superfície residual, cota média de 759 m, constituída predominantemente por calcários de coloração preto a cinza, cujas camadas, raras vezes, possuem lentes pelíticas a margosas (**Figura 7.30**). Nesse contexto geomorfológico se encontram os altos gradientes hidráulicos (**Figura 7.31**) e as principais áreas de recarga da área piloto da bacia do Rio Vieira.

Nesse grupo estão reunidos sete poços (C-043, C-046, C-048, C-049, C-052, C-053 e C-057) e a amostra da surgência do Rebentão dos Ferros (CS-056). É importante ressaltar, que devidos aos aspectos expostos, os poços do Grupo 1 estão situados no domínio de maior circulação de água e, consequentemente menor tempo de residência/contato água- rocha.

Grupo 2:

Os poços pertencentes ao Grupo 2 estão localizados na parte centro leste da área piloto da Bacia do Rio Vieira, que é caracterizada por pertencer ao perímetro urbano de Montes Claros, e que, portanto, são potencialmente impactados pelas atividades humanas que ocorrem na área (**Figura 7.33**).

No tocante aos aspectos naturais nota-se que com relação a presença de zona de falhas (**Figura 7.29**), a área onde estão os poços do grupo 2 mostra menor densidade se comparada com a área do Grupo 1. Esse setor é marcado ainda por poucas ou quase ausência de dolinas, conforme atesta a **Figura 7.32**.

A geomorfologia e geologia, também, se mostram distintas, sendo que a geomorfologia é caracterizada por uma superfície de aplainamento de cota média de 650 m, composta predominantemente por calcarenitos, siltitos e folhelhos amarelo-esverdeados que por vezes, evoluem para margas esverdeadas (**Figura 7.30**). Nesse contexto geomorfológico estão presentes os menores gradientes hidráulicos e as principais áreas de descarga da área piloto da bacia do Rio Vieira (**Figura 7.31**)

Nesse grupo, portanto, estão os seis poços (C-044, C-045, C-047, C-050, C-051 e C-084). Ressalta-se que os poços localizados na área do grupo 1 estão sujeitos a processos relacionados a circulação mais lenta e ao maior contato água rocha, devido aos fatores levantados.

7.3.1 Estatística Descritiva

As características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas possuem variações condicionadas por fatores diversos, como os descritos no item anterior além dos efeitos 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 (Grupo 1 e Grupo 2) por período amostral (seco e úmido) (**Tabelas 7.6 e 7.7; 7.10 e 7.11**).

As amostras do Grupo 1 contemplam os poços localizados nos setores minimamente afetados por fatores antrópicos, e inseridas na superfície residual, cota média de 759 m, dominada por calcário com poucas intercalações pelíticas. Os poços desse grupo apresentam, ainda, gradiente hidráulico elevado e estão distribuídos nas principais áreas de recarga da área piloto da bacia do Rio Vieira.

Com relação aos STD as amostras mostram uma baixa mineralização, quando comparadas com as águas típicas de aquíferos cársticos-fissurais. Todos os valores encontrados para STD, nos dois períodos de coleta, foram inferiores a 500 mg/L. No período seco os valores de STD presentes nas águas dos poços amostrados variaram de 286 (C-052) a 390 mg/L (C-049), com média de 334,29 mg/L e mediana de 340 mg/L. No período úmido, os teores não apresentaram mudanças expressivas, variando de 232 (C-053) a 393 mg/L (C-049), com média de 340,86 mg/L e mediana de 345 mg/L.

As águas subterrâneas do Grupo 1 são classificadas quanto à quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) por unidade de volume de água, como predominantemente doces nos dois períodos distintos de coleta de água, conforme a classificação de McNeely *et. al* (1979) (**Tabela 7.8**)

O comportamento do CE nas águas dos poços do Grupo 1, é semelhante ao STD, mostrando, entretanto, valores levemente mais altos no período úmido (média 645,12 $\mu\text{S/cm}$) em relação ao período seco (média de 532 $\mu\text{S/cm}$).

Os valores de temperatura nas amostras de água do Grupo 1 oscilaram entre 19,2 (C-043) e 26,3 °C (C-052), com valor da média em torno de 23,87 °C, no período seco. Já no úmido os valores variaram de 20,30 (C-49) a 26,7 °C (C-053), com média de 23,41 °C. Nota-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 a temperatura da água no interior do poço. Dessa forma, acredita-se que variação de temperatura aqui evidenciada, não está influenciando o comportamento do CO_2 dissolvido nessas águas, e nem refletindo, no teor de cálcio, já que para acontecer escape de CO_2 e precipitação de CaCO_3 seria necessário um aumento mais relevante da temperatura da água no aquífero propriamente dito.

Nas amostras do Grupo 1, no período seco, os valores de pH variam de 6,93 (C-052) e 7,53 (C-048), com média de 7,29, sendo indicativo de pH com tendência a levemente alcalino. Dentre as amostras do período úmido, os

valores de pH, também com tende a levemente alcalino, variaram 6,99 (C-043) e 7,65 (C-048), com média de 7,34. Comparando-se os valores de pH nos dois períodos de amostragem, verifica-se que não ocorreram grandes variações entre um período e outro de amostragem.

Tabelas 7.6 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período seco (n=7) na Bacia do Rio do Vieira.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,93	7,53	7,29	7,24	0,22	2,96	0,60
T (°C)	19,20	26,30	23,87	25,00	2,78	11,64	7,10
CE (µS/cm)	467,00	633,00	532,0	520,00	59,17	11,12	166,00
ORP (mV)	-79,20	252,30	98,20	160,00	131,07	133,47	331,50
STD (mg/L)	286,00	390,00	334,29	340,00	43,71	13,07	104,00
Dureza (mg/L)	191,00	242,00	212,14	209,00	17,11	8,07	51,00
Cálcio (mg/L)	65,30	78,60	73,86	75,40	4,71	6,37	13,30
Magnésio (mg/L)	2,30	13,00	6,70	6,73	3,44	51,30	10,70
Sódio (mg/L)	2,08	21,30	10,46	9,98	6,54	62,55	19,22
Potássio (mg/L)	0,90	1,40	1,11	1,09	0,20	18,33	0,50
Bicarbonato (mg/L como CaCO ₃)	229,00	332,00	265,57	262,00	32,94	12,40	103,00
Carbonato (mg/L como CaCO ₃)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfato (mg/L)	2,72	32,50	13,06	10,40	10,25	78,53	29,78
Cloreto (mg/L)	0,50	6,80	3,06	1,75	2,66	86,92	6,30
Fluoreto (mg/L)	0,05	0,46	0,14	0,11	0,14	103,49	0,41
Amônia (mg/L como NH ₃)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Nitrito (mg/L como N)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Nitrato (mg/L como N)	0,15	2,96	0,74	0,31	1,01	136,43	2,81
Ferro (mg/L)	0,01	5,18	0,96	0,04	1,89	196,35	5,17
Manganês (mg/L)	0,00	0,78	0,19	0,04	0,31	160,0	0,78

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

Com relação aos íons maiores, nas amostras do Grupo 1, nota-se que não houve variações significativas dos teores para as duas campanhas avaliadas. O bicarbonato é o principal ânion destas águas do Grupo 1, com concentrações variando entre 229 (C-062) e 332 mg/L (C-067) no período seco, e de 215 a 295 mg/L no período úmido. O cátion dominante é o cálcio para os dois períodos de coleta, variando de 65,3 (C-048) a 78,6 mg/L (C-053), com média de 73,86 mg/L no período seco, e de 61,4 (C-049) a 99,2 mg/L (C-052), com média de 76,69 mg/L para o período úmido. O cálcio em conjunto com o bicarbonato, são os principais responsáveis pela leve elevação dos teores de STD dessas águas.

Outros íons principais, magnésio, sódio, potássio, sulfato e cloreto ocorrem em teores discretos, não contribuindo, assim, de forma efetiva para o quimismo dessas águas.

Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período úmido (n=7) na Bacia do Rio do Vieira.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,99	7,65	7,34	7,36	0,24	3,28	0,66
T (°C)	20,30	26,70	23,41	22,90	2,22	9,49	6,40
CE (µS/cm)	512,00	821,00	645,14	625,00	112,86	17,49	309,00
ORP (mV)	6,80	186,20	96,11	98,60	69,66	72,48	179,40
STD (mg/L)	232	393,00	340,86	345,00	54,37	15,95	161,00
Dureza (mg/L)	172	267,00	216,71	207,00	31,96	14,75	95,00
Cálcio (mg/L)	61,4	99,20	76,60	71,40	15,39	20,09	37,80
Magnésio (mg/L)	2,49	12,20	6,07	4,64	3,23	53,16	9,71
Sódio (mg/L)	2,36	19,60	9,45	9,00	5,65	59,84	17,24
Potássio (mg/L)	0,39	1,41	0,95	1,07	0,42	44,57	1,02
Bicarbonato (mg/L como CaCO ₃)	215	295,00	257,29	268,00	29,61	11,51	80,00
Carbonato (mg/L como CaCO ₃)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfato (mg/L)	2,50	59,10	15,97	10,70	19,71	123,38	56,60
Cloreto (mg/L)	0,50	20,00	8,97	6,70	7,78	86,71	19,50
Fluoreto (mg/L)	0,14	0,62	0,34	0,33	0,16	47,26	0,48
Fosfato (mg/L como P)	0,01	0,10	0,02	0,01	0,03	152,00	0,10
Amônia (mg/L como NH ₃)	0,05	0,12	0,06	0,05	0,02	41,44	0,07
Nitrito (mg/L como N)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Nitrato (mg/L como N)	0,25	4,60	0,91	0,25	1,63	179,80	4,35
Ferro (mg/L)	0,03	0,70	0,19	0,13	0,23	122,13	0,67

Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 1 coletadas no período úmido (n=7) na Bacia do Rio do Vieira - Continuação.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
	0,0005	0,4450	0,0865	0,0268	0,1609	185,87	0,4445
Arsênio (mg/L)	0,0005	0,0010	0,0006	0,0005	0,0002	34,80	0,0005
Boro (mg/L)	0,0005	0,0441	0,0080	0,0005	0,0163	203,88	0,0436
Bário (mg/L)	0,0056	0,0420	0,0229	0,0250	0,0124	54,20	0,0364
Cádmio (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Chumbo (mg/L)	0,0005	0,0034	0,0011	0,0005	0,0011	102,44	0,0029
Cobre (mg/L)	0,0005	0,0139	0,0032	0,0005	0,0050	156,97	0,0134
Cromo (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Mercúrio (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Níquel mg/L	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Zinco (mg/L)	0,0005	0,2260	0,0393	0,0044	0,0828	210,46	0,2255

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

Tabela 7.8- 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

No período seco os teores da dureza variaram de 191 (C-191) a 242 mg/L (C-042), com média 212,14 mg/L e mediana de 209 mg/L. Para o período úmido, os valores da dureza para as águas do aquífero Bambuí Grupo 1, variaram entre um mínimo de 172(C-048) e um máximo de 393 mg/L (C-052), com média de 216,71 mg/L e mediana de 207 mg/L.

A Tabela 7.9 mostra a classificação da dureza segundo Custódio & Llamas (1983). De acordo com essa classificação, nos poços do Grupo 1, as águas muito duras são dominantes nos dois períodos de amostragem, com exceção do poço C-048, que mostra água dura, e a surgência (CS-056) (Figura 7.34).

Os gráficos de correlação entre a dureza e íons cálcio dois períodos de amostragem, mostram que os maiores valores da dureza estão relacionados como os teores elevados do cálcio, sugerindo, portanto, que a dureza das águas locais, é controlada, principalmente, pela presença de teores elevados de cálcio, íon dominante na composição litológica dos calcários na bacia do Rio do Vieira (Figuras 7.35 e 7.36).

Tabela 7.9 - Classificação das águas segundo a dureza (mg/L como CaCO₃) (Custódio & Llamas, 1983).

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

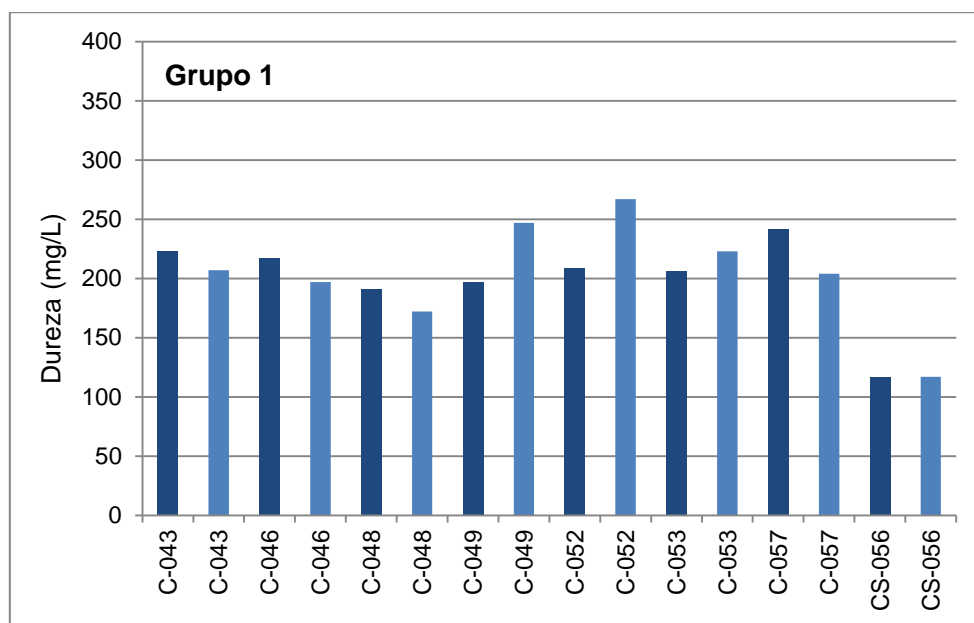


Figura 7.34 - Resultados de dureza (mg/L como CaCO₃) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

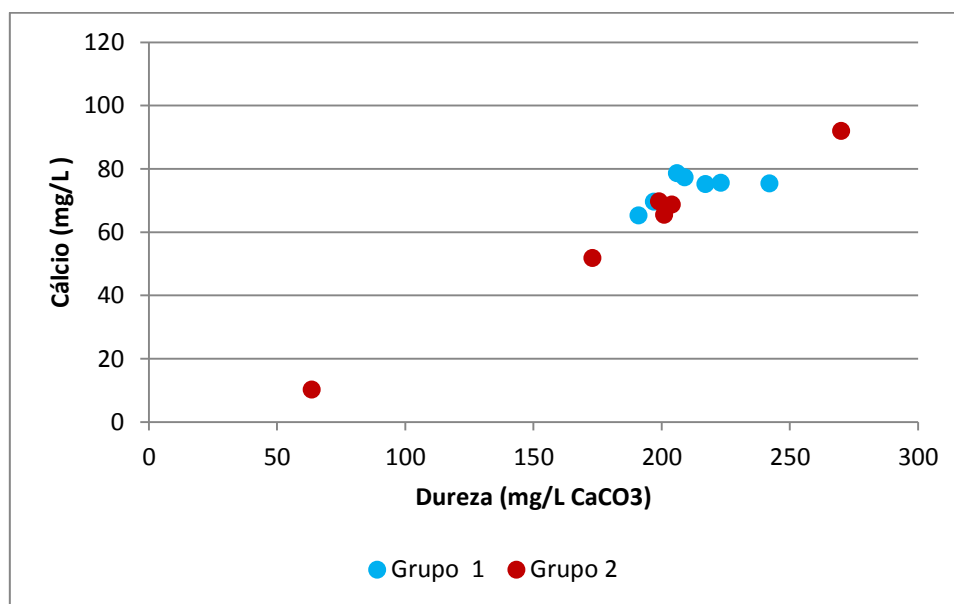


Figura 7.35 - Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira.

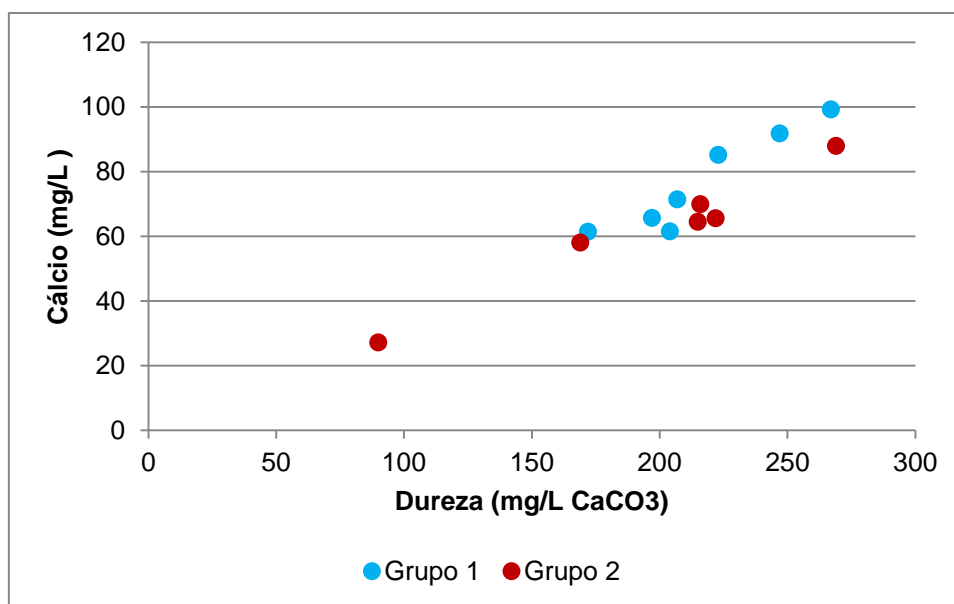


Figura 7.36 - Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período úmido para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira.

As amostras de águas do Grupo 2 agrupam os poços situados numa superfície de aplainamento de cota média de 650 m, dominada por calcarenitos, siltitos e pelitos da Formação Lagoa Jacaré. Esses poços do grupo 2 estão, também, em área de descarga, com poucas falhas e quase sem dolinas ou cavidades. Todos estão localizados no perímetro urbano de Montes Claros e, portanto, são potencialmente impactados pelas atividades humanas que ocorrem na área. As Tabelas 7.10 e 7.11 mostram os resultados dos parâmetros analisados nas águas do Grupo 2, respectivamente, para os períodos seco e úmido.

A concentração de STD nas águas do Grupo 2 alcançaram teores dentro dos intervalos de 140 (C-045) e 626 mg/L (C-051), com média de 351,83 mg/L no período seco e variando de 164,00 (C-045A) a 541,00 mg/L (C-051), com média de 353,67 mg/L no período úmido. As águas do Grupo 2 são caracterizadas por mostrarem pouco mineralizadas, com os teores de STD inferiores a 626 mg/L nos dois períodos de coletas, porém mais enriquecidas em sais se comparada às águas do Grupo 1.

No tocante à quantidade de STD por unidade de volume de água, as águas subterrâneas do Grupo 2 são classificadas como predominantemente doces nos dois períodos distintos de coleta de água, conforme a classificação de McNeely et. al., (1979) (Tabela 10.8).

Com relação aos resultados de pH, as águas dos poços do Grupo 2 apresentaram um caráter levemente ácido com tendência a básico no período seco, com os valores variando de 6,41 (C-045) a 7,15 (C-044), com média de 6,82, enquanto que no período úmido as amostras apresentaram-se mais básica 7,23 (C-044) a 7,86 (C-084), com média de 7,40).

Na comparação dos valores de pH entre os dois Grupos, nota-se que as amostras do Grupo 1 mostram resultados mais homogêneos de pH. A explicação para o caráter levemente ácido das águas do Grupo 2, no período seco, pode estar associada a influência de outras litologias intercaladas nos calcários ou ainda relacionado a pequena elevação dos teores de nitrato, por

consequência da matéria orgânica, comumente, presente nos efluentes domésticos. Esses comportamentos podem ser observados nos poços C-045A e C-047 podendo, portanto, estar relacionados à contaminação antrópica ou aos aspectos geológicos.

Tabelas 7.10 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 2 (período seco n=6) na Bacia do Rio do Vieira.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,41	7,15	6,82	6,89	0,32	4,68	0,74
T (°C)	25,00	27,00	26,23	26,50	0,85	3,24	2,00
CE (µS/cm)	186,00	746,00	520,50	500,50	198,45	38,13	560,00
ORP (mV)	-167,40	239,00	51,80	28,00	163,60	315,83	406,40
STD (mg/L)	140,00	626,00	351,83	316,50	165,79	47,12	486,00
Dureza (mg/L)	63,50	270,00	185,08	200,00	67,74	36,60	206,50
Cálcio (mg/L)	10,30	92,00	59,67	67,10	27,43	45,96	81,70
Magnésio (mg/L)	6,06	10,50	8,72	9,08	1,57	17,98	4,44
Sódio (mg/L)	9,37	64,50	24,16	15,30	20,80	86,10	55,13
Potássio (mg/L)	1,34	1,98	1,70	1,74	0,26	15,11	0,64
Bicarbonato (mg/L como CaCO ₃)	72,30	338,00	240,88	256,00	94,49	39,23	265,70
Carbonato (mg/L como CaCO ₃)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfato (mg/L)	0,50	22,50	7,14	5,05	8,15	114,12	22,00
Cloreto (mg/L)	2,76	45,90	21,22	20,80	17,70	83,44	43,14
Fluoreto (mg/L)	0,03	0,13	0,07	0,05	0,04	60,79	0,10
Amônia (mg/L como NH ₃)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
Nitrito (mg/L como N)	0,01	0,10	0,03	0,01	0,04	148,26	0,09
Nitrato (mg/L como N)	0,15	5,80	1,61	0,52	2,25	139,62	5,65
Ferro (mg/L)	0,03	1,46	0,67	0,64	0,71	104,66	1,43
Manganês (mg/L)	0,00	0,75	0,30	0,25	0,29	99,22	0,74

Tabelas 7.11 – Sumário estatístico das águas do aquífero Bambuí Grupo 2 (período úmido n=6) na Bacia do Rio do Vieira.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	7,23	7,86	7,40	7,34	0,23	3,12	0,63
T (°C)	23,50	26,30	25,10	25,20	1,13	4,49	2,80
CE (µS/cm)	279,00	832,00	592,67	544,00	208,84	35,24	553,00
ORP (mV)	-138,00	228,20	71,80	129,30	149,03	207,56	366,20
STD (mg/L)	164,00	541,00	353,67	336,50	123,71	34,98	377,00
Dureza (mg/L)	90,00	269,00	196,83	215,50	61,20	31,09	179,00
Cálcio (mg/L)	27,20	88,00	62,22	65,05	19,92	32,01	60,80
Magnésio (mg/L)	5,35	14,00	10,02	10,95	3,70	36,99	8,65
Sódio (mg/L)	11,40	25,60	18,08	16,80	6,36	35,17	14,20
Potássio (mg/L)	1,56	2,62	1,96	1,78	0,45	22,88	1,06
Bicarbonato (mg/L como CaCO₃)	91,80	311,00	225,47	243,50	88,50	39,25	219,20
Carbonato (mg/L como CaCO₃)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sulfato (mg/L)	0,50	28,90	9,46	7,88	10,13	107,17	28,40
Cloreto (mg/L)	3,36	47,10	22,26	19,85	18,82	84,55	43,74
Fluoreto (mg/L)	0,05	0,30	0,18	0,18	0,09	47,90	0,25
Fosfato (mg/L como P)	0,02	0,07	0,04	0,04	0,02	50,78	0,05
Amônia (mg/L como NH₃)	0,05	2,82	0,61	0,14	1,09	179,41	2,77
Nitrito (mg/L como N)	0,01	0,05	0,02	0,01	0,02	97,98	0,04
Nitrato (mg/L como N)	0,25	6,90	2,08	0,53	2,78	133,91	6,65
Ferro (mg/L)	0,002	2,35	0,64	0,04	1,00	156,49	2,35
Manganês (mg/L)	0,003	1,08	0,33	0,15	0,43	130,83	1,08

Arsênio (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Boro (mg/L)	0,0005	0,1010	0,0224	0,0005	0,0441	196,65	0,1005
Bário (mg/L)	0,0088	0,0417	0,0229	0,0224	0,0124	54,19	0,0329
Cádmio (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Chumbo (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Cobre (mg/L)	0,0005	0,0024	0,0010	0,0005	0,0008	78,75	0,0019
Cromo (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Mercúrio (mg/L)	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Níquel mg/L	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0000	0,00	0,0000
Zinco (mg/L)	0,0032	0,1950	0,0488	0,0193	0,0820	168,06	0,1918

Os valores de temperatura nas amostras de água do Grupo 2 oscilaram entre 25 (C-044) e 27 °C (C-051, C-084), com valor da média de 26,23 °C, no período seco. Já no úmido os valores variaram de 23,50 (C-047) a 26,30 °C (C-045A), com média de 25,20 °C. Nota-se que no período seco as temperaturas das amostras foram levemente superiores às do período úmido. Quando compara-se os valores da temperatura entre os dois grupos, percebe-se que os valores da temperatura do Grupo 2 estão mais elevados, devido aos poços do Grupo 2 estarem em área de descarga de baixo gradiente hidráulico.

Entre os cátions, o cálcio se destaca nas amostras analisadas, não apresentando significativas variações entre os dois períodos de coleta. No período seco os teores oscilaram entre 10,30 (C-045) a 92,0 mg/L (C-050), com média de 59,67 mg/L, enquanto que no período úmido variaram de 27,20 (C-045A) a 88,00 (C-051), com média de 62,22 mg/L.

Comparando os resultados dos dois grupos para os teores de cálcio, nota-se que as amostras do Grupo 1 estão mais enriquecidas, fato certamente decorrente das diferenças litológicas entre os grupos, já que o Grupo 1 é constituído de calcário maciço sem intercalações.

Com relação aos ânions, o bicarbonato é o dominante nas amostras de água do Grupo 2, variando 73,3 (C-045) a 338 mg/L (C-051), com média de 240,88 mg/L, no período seco. No período úmido variou de 91,8 (C-045A) a 311 mg/L (C-084), com média de 225,47 mg/L. Nota-se, portanto, uma leve tendência de aumento no período seco.

Quando se compara os teores de bicarbonatos entre os grupos, verifica-se que as amostras do Grupo 1 apresentam maiores teores, o que deve ser resultado das características dos diferentes tipos litológicos que predominam nos dois grupos. No caso da área em que estão situados os poços do Grupo 1, o litotipo dominante é o calcário maciço e sem intercalações.

Os outros elementos principais, magnésio, sódio, potássio, sulfato e cloreto ocorrem em teores discretos, não contribuindo, assim, de forma efetiva para o quimismo dessas águas.

As **Tabelas 7.10 e 7.11** mostram os teores da dureza nas águas do Grupo 2, no período seco e úmido, respectivamente. No período seco, variaram em 63,5 (C-045) a 270 mg/L (C-050), com média de 185 mg/L. Para o período úmido, os valores da dureza variaram entre um mínimo de 90 (C-045A) e um máximo de 269 mg/L (C-051), com média de 196,83 mg/L. Com relação à classificação de Custódio & Llamas (1983) (**Tabela 7.9**) as águas muito duras são as predominantes, seguidas de amostras dura, e apenas a amostra (C-045 e C-045A) mostrou-se como pouco dura (**Figura 7.37**).

Comparando os resultados da dureza nos dois grupos de amostras nota-se, que o Grupo 1 apresenta teores levemente mais elevados da dureza do que o Grupo 2.

Os gráficos de correlação entre a dureza e íons cálcio nos dois períodos de amostragem, no Grupo 2, sugerem que a dureza das águas locais é controlada, principalmente, pela presença de teores elevados de cálcio, semelhante ao verificado para o Grupo 1 (**Figuras 7.35 e 7.36**).

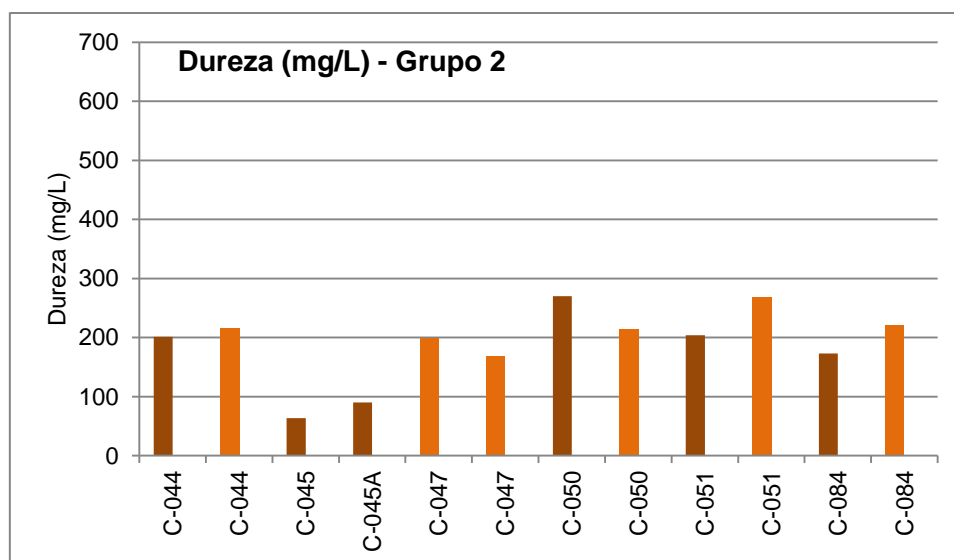


Figura 7.37 – Resultados de Dureza (mg/L como CaCO₃) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

7.3.2 Caracterização e distinção dos grupos de poços

No geral, os dois grupos de poços são relativamente semelhantes, entretanto, com base em alguns aspectos levantados é possível distingui-los. Alguns dos critérios de diferenciação são destacados a seguir:

a) Aspectos Litológicos:

As **Figuras 7.38 e 7.39** mostram os teores de STD, nos Grupos 1 e 2, nos dois períodos distintos de amostragem. No Grupo 1 os teores de STD apresenta, no geral, um comportamento homogêneo em ambos os períodos. Esse comportamento também é homogêneo quando se faz a comparação entre resultados dos mesmos poços em períodos diferenciados.

Em relação aos poços do Grupo 2, o comportamento é diverso do observado com o Grupo 1, ou seja, no Grupo 2 os teores apresentam comportamentos heterogêneos, tanto quando se analisam o conjunto de poços, como na comparação de poços individuais nos dois períodos de amostragem.

Todas as amostras de água de ambos os grupos de poços apresentam teores de STD acima de 1000 mg/L, sendo, portanto, águas doces conforme a classificação de McNeely *et. al* (1979). Percebe-se que os poços do Grupo 1 registram teores de STD sempre inferiores a 400 mg/L. Os poços dos Grupo 2, entretanto, mostram uma leve elevação, com teores acima de 400 mg/L, com exceção dos poços: C-044, C-045, C-045A e C-047. Inclusive com os poços C-045 e C-045A com teores de STD um pouco acima de 100 mg/L.

Nesse contexto, observa-se que o quimismo dos grupos certamente tem relação com fatores geogênicos, que são diferenciados entre ambos. Conforme já expressado, os poços pertencentes ao Grupo 1 estão situados em área constituída por um calcário puro e maciço, enquanto os poços do Grupo 2 se apresenta com intercalações de siltitos e pelitos, especialmente nos poços C-045 e C-045A, que apresentam 10 m de siltitos intercalados no calcário e que provoca, possivelmente, a diminuição dos teores de STD. Os poços C-050 e C-051 apresentam os maiores teores de STD, decorrentes dos argilitos intercalados nos calcários.

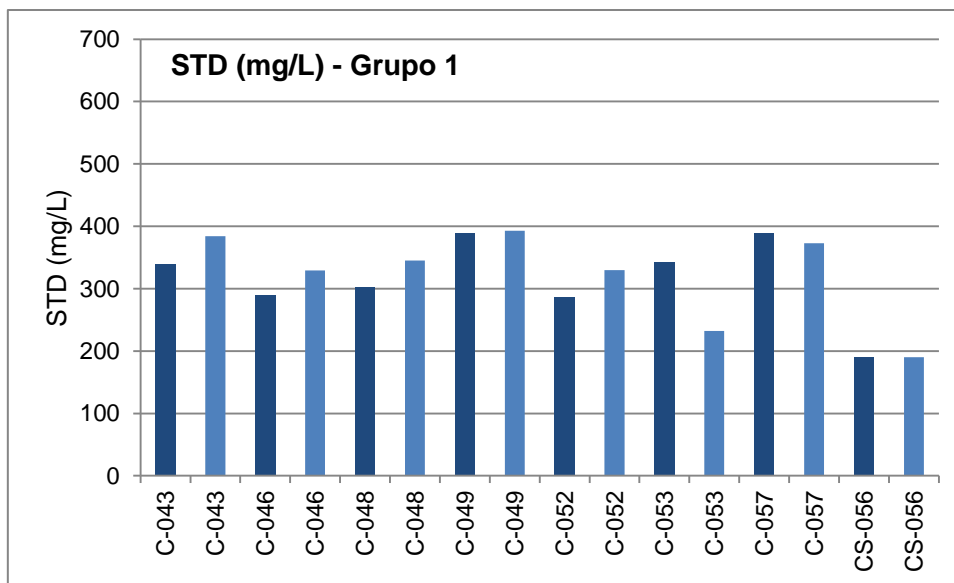


Figura 7.38 - Resultados de STD (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

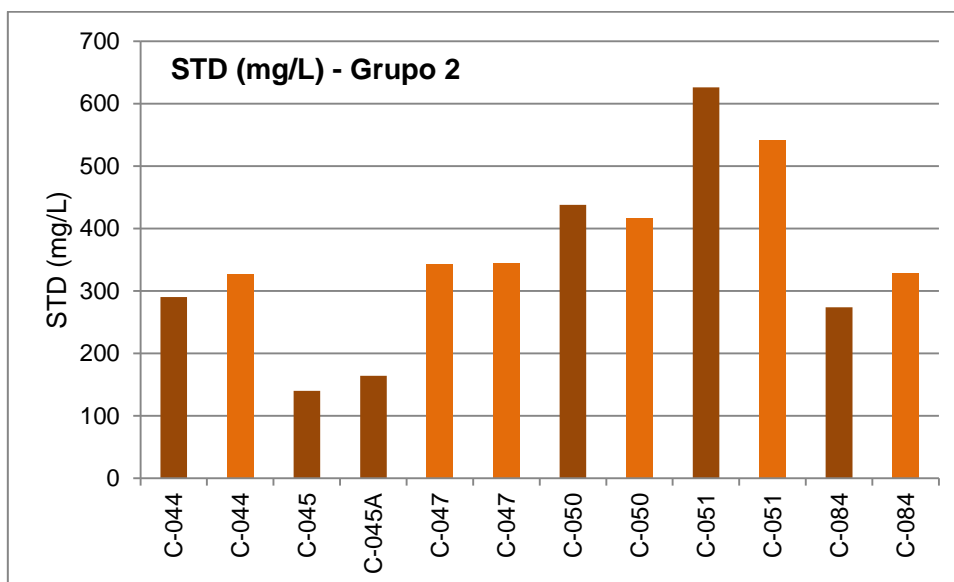


Figura 7.39 - Resultados de STD (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

As litologias calcárias distintas em cada grupo, também, se refletem nos resultados de pH. Nota-se que nos poços do Grupo 1 os valores de pH são sempre homogêneos, tanto no aspecto do conjunto de poços quanto no tocante a comparação para o mesmo poço em períodos diferentes (**Figura 7.40**). Já os poços do Grupo 2 têm características opostas, são heterogêneos nas duas situações (**Figura 7.41**).

Essas diferenças de comportamento estão traduzidas claramente, nos valores de pH. Os poços do Grupo 1 registram na sua maioria valores acima de 7,0, sem grandes variações entre os valores, indicando um ambiente básico, ocasionado principalmente pela natureza do ambiente geológico em que as águas são captadas (calcários mais puros) e com interferência expressiva do tamponamento do bicarbonato, que mantém os valores de pH sem grandes variações nos dois períodos sazonais (**Figura 7.40**).

O Grupo 2 para ambos períodos de amostragem os valores de pH se mostram com variações e 6,4 a acima de 7,8, portanto, com amplitude maior do que registrado no Grupo 1. Inclusive, com os poços C-045, C-047 e C-084 com valores abaixo de 6,8, indicando um ambiente levemente ácido, ocasionado, certamente, pela influência de outras litologias, intercaladas no calcário, como a presença dos siltitos (**Figura 7.44**).

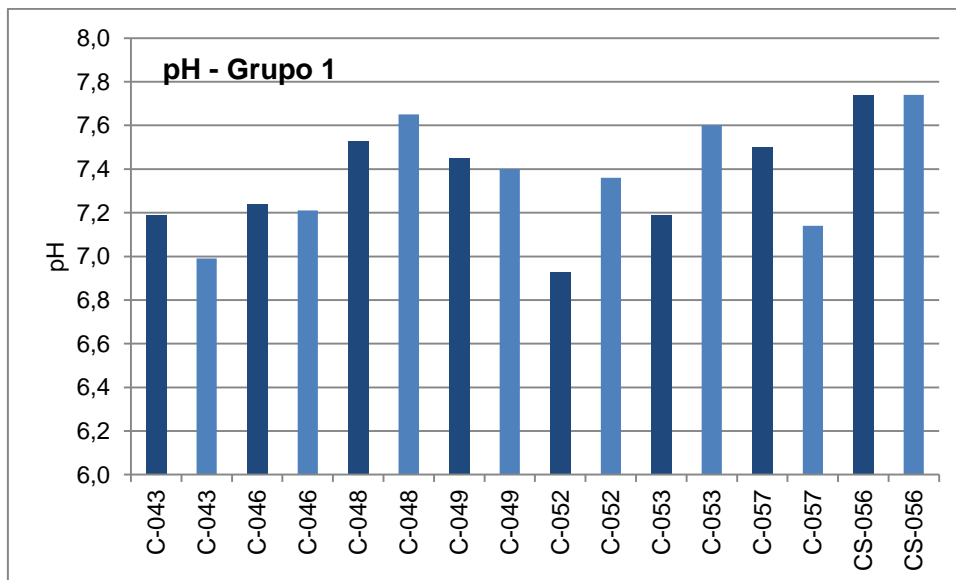


Figura 7.40 - Resultados de pH das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira.
Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

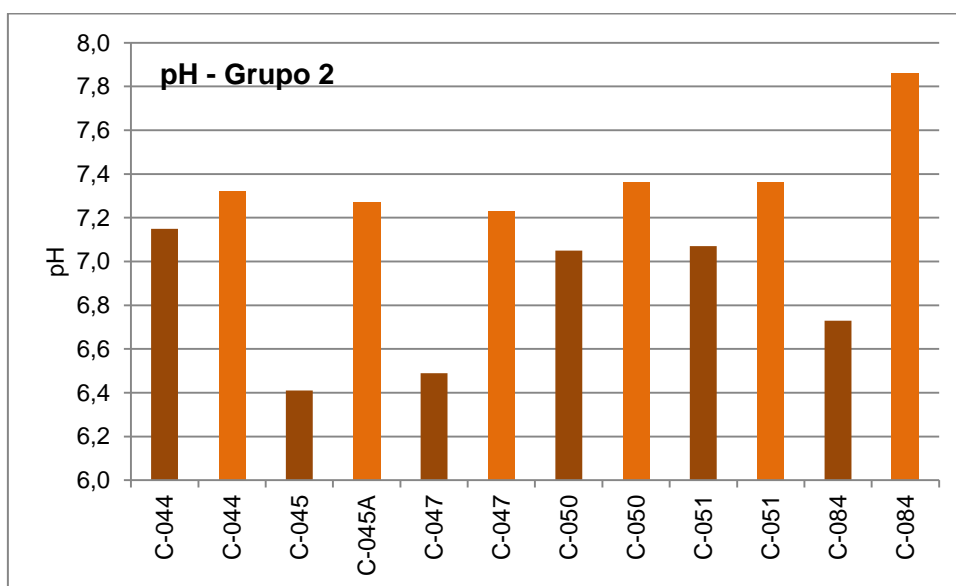


Figura 7.41 - Resultados de pH das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira.
Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

A dureza é outro parâmetro utilizado, nesse trabalho, para distinguir os dois grupos de poços, com base nos tipos litológicos que os compõem e de sua influência no quimismo destas águas.

Nos dois grupos de poços, os resultados da dureza mostram teores relativamente homogêneos, tanto na análise dos períodos de amostragem, como ao se comparar o mesmo poço em períodos diferentes (**Figuras 7.42 e**

7.43). Apesar dessas semelhanças no comportamento desse parâmetro, é nítido que o Grupo 2 possui águas brandas a duras, ocasionado provavelmente pelas camadas de siltitos intercalados nos calcários. Já no Grupo 1, os poços são completados no calcário puro, tendo, portanto, um domínio de águas muito duras, conforme a classificação de Custódio & Llamas (1983).

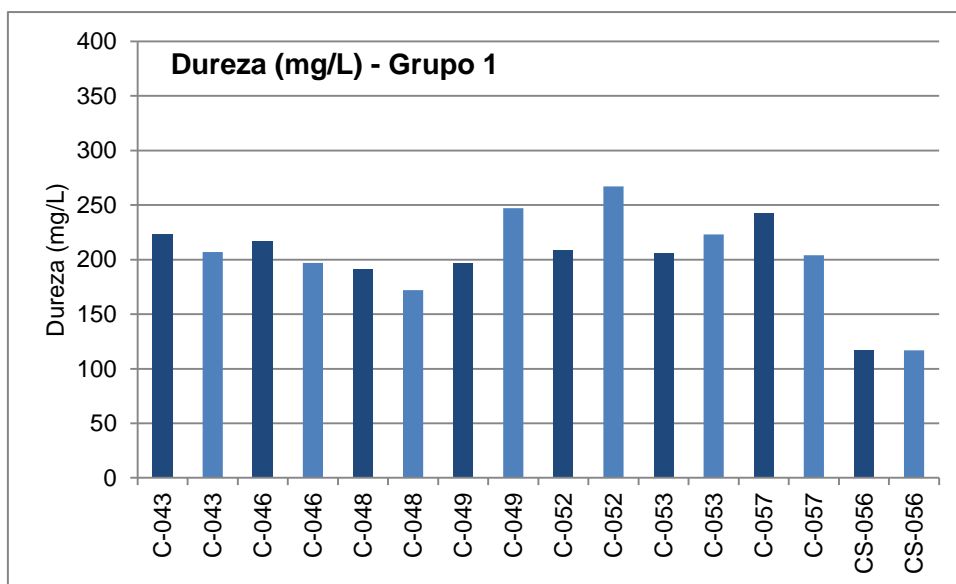


Figura 7.42 - Resultados de dureza (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

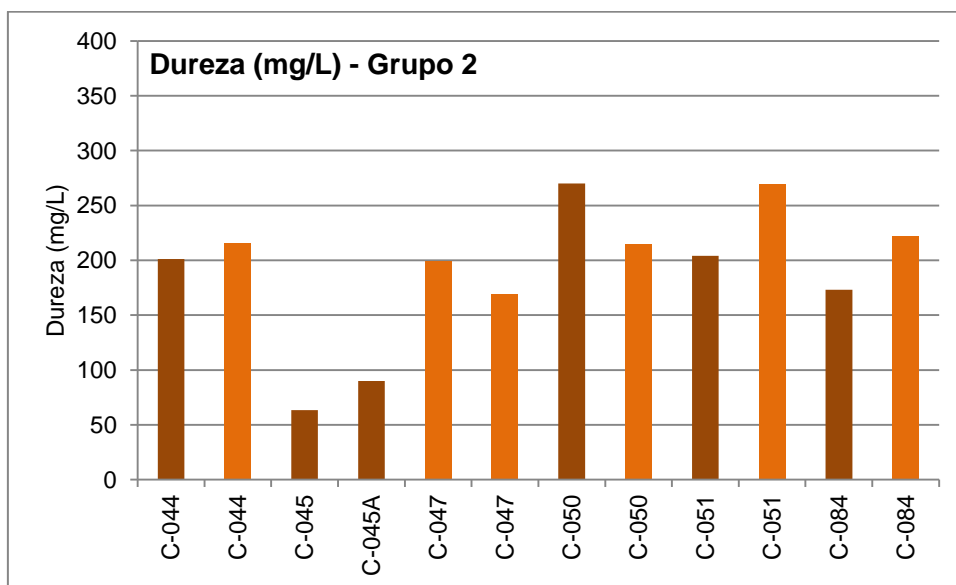


Figura 7.43 - Resultados de dureza (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

Os resultados de bicarbonato e cálcio nas amostras de águas estão condicionados aos aspectos geológicos das áreas em que se encontram os dois grupos de poços, da mesma forma que o observado para os valores de STD e pH. As **Figuras 7.44 e 7.45** mostram os teores nos dois grupos de poços, em períodos distintos de amostragem.

A **Figura 7.44** apresenta os teores de bicarbonato no período seco e úmido para os poços no Grupo 1. Percebe-se que os teores de bicarbonato

permanecem quase sem alterações tanto quando se compara os resultados no conjunto como no estudo individual por poço, considerando os dois períodos de amostragem. No tocante aos poços do Grupo 2, **Figura 7.45**, o comportamento é diverso, ou seja, existem variações mais significativas dos teores de bicarbonatos entre os teores do mesmo poço amostrado em períodos distintos, e também, quando se comparam os teores na totalidade.

Os comportamentos evidenciados pelos resultados dos teores de bicarbonato estão associados aos tipos litológicos, dominantes em cada Grupo, conforme já relatado nas interpretações dos dados de STD e pH.

É importante destacar, ainda, que o modo de ocorrência tanto do cálcio quanto do bicarbonato mostra-se semelhantes para ambos grupos, apresentando, portanto, boa correspondência como pode ser visualizado nas **Figuras 7.46 e 7.47**.

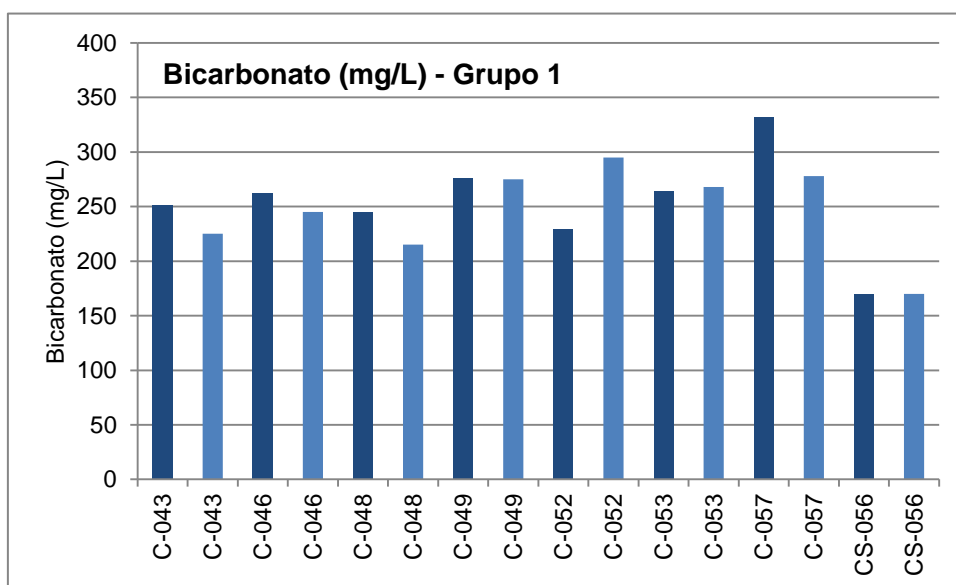


Figura 7.44 - Resultados de Bicarbonato (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

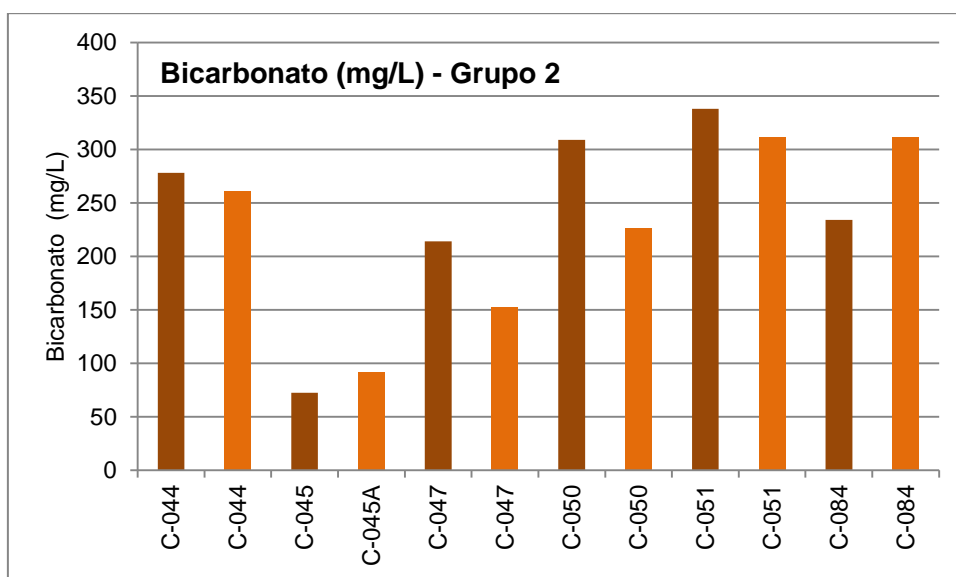


Figura 7. 45 - Resultados de Bicarbonato (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

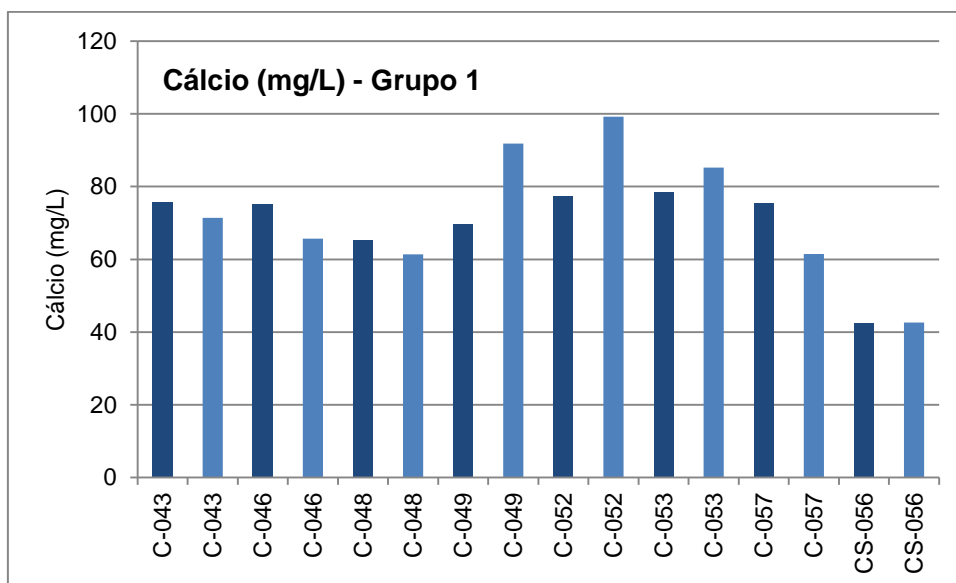


Figura 7.46 - Resultados de Cálcio (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

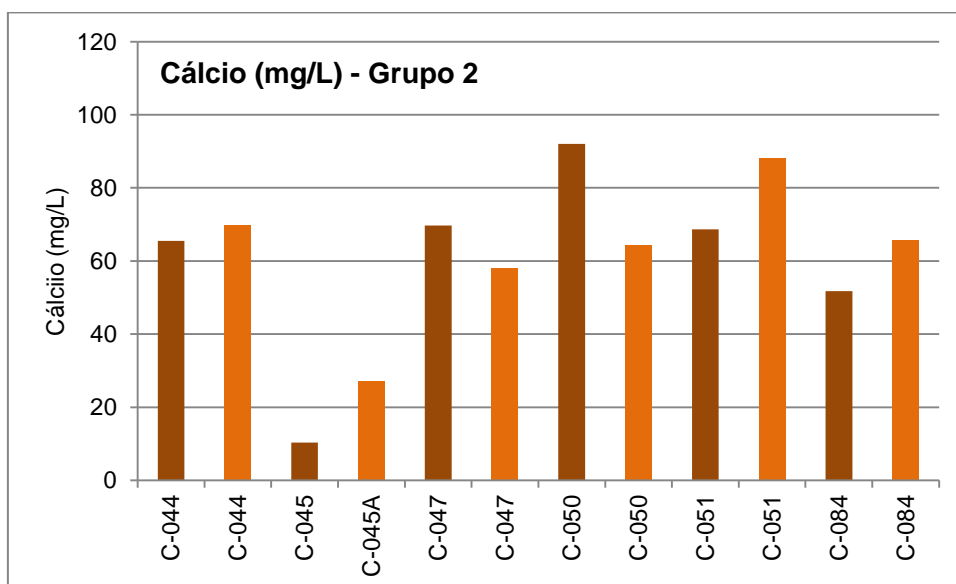


Figura 7.47 - Resultados de Cálcio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

b) Aspectos estruturais, cársticos, geomorfológicos e gradiente hidráulico:

Os aspectos estruturais, cársticos, geomorfológicos e de gradiente hidráulico são utilizados nesse estudo como indicativos das diferentes evoluções e circulações das águas em cada grupo.

Em ambiente subterrâneo, há em geral um aumento gradativo dos teores de cloreto a partir da zona de recarga do aquífero em direção as áreas de descargas. É comum, também, água pluviométrica infiltrar como bicarbonatada na área de recarga e se enriquecer em cloreto ou em sódio ao longo do fluxo subterrâneo. Foi com essa finalidade que se usou o parâmetro cloreto para avaliar a evolução dessas águas com relação, principalmente, as áreas de recargas e descargas.

Os poços que compõem o Grupo 1 estão situados, preferencialmente, em zonas de recargas e com altos gradientes hidráulicos, e também com concentrações significativas de falhas, dolinas e cavidades. Essas condições favorecem uma rápida renovação e circulação de água de infiltração, que certamente estariam dando condições para águas dos poços do Grupo 1 mostrarem a maioria dos teores de cloreto no limite de detecção ou muito baixo (**Figura 7.48**).

Com relação ao Grupo 2, os teores de cloreto são mais expressivos quando comparados aos poços do Grupo 1. É preciso ressaltar que os poços do Grupo 2 estão inseridos em uma área de descarga, de carstes poucos evoluídos e com poucos falhamentos, que contribuem para um cenário de menor circulação de água e, conseqüentemente, um maior tempo de interação água e rocha. Não fica, entretanto, descartado o componente antrópico para justificar os teores elevados de cloreto nas águas dos poços do Grupo 2, considerando que os mesmos estão inseridos em um ambiente urbano (**Figura 7.49**).

Salienta-se que o gradiente hidráulico alto, em conjunto com a geomorfologia (topografia mais elevada) da área onde os poços do Grupo 1 estão localizados, podem proporcionar um escoamento da água subterrânea no sentido do Grupo 1 para o Grupo 2. Esse processo pode ocasionar, assim, um maior enriquecimento do cloreto nas águas do Grupo 2, conforme evidenciado na **Figura 7.49**.

A relação do cloreto com STD, para os dois Grupos de poços, reforça que o cloreto é responsável pela mineralização das águas do Grupo 2 em detrimento das águas do Grupo 1, **Figura 7.50**.

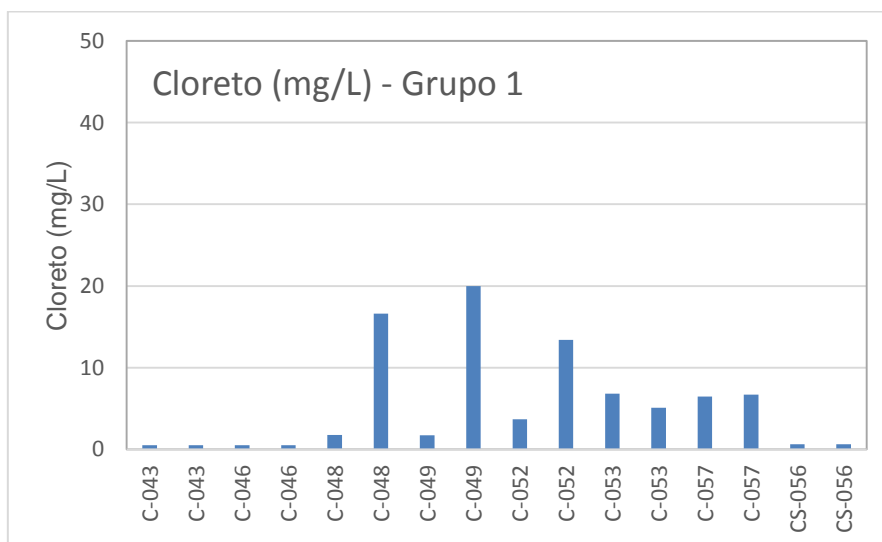


Figura 7.48 - Resultados de cloreto (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

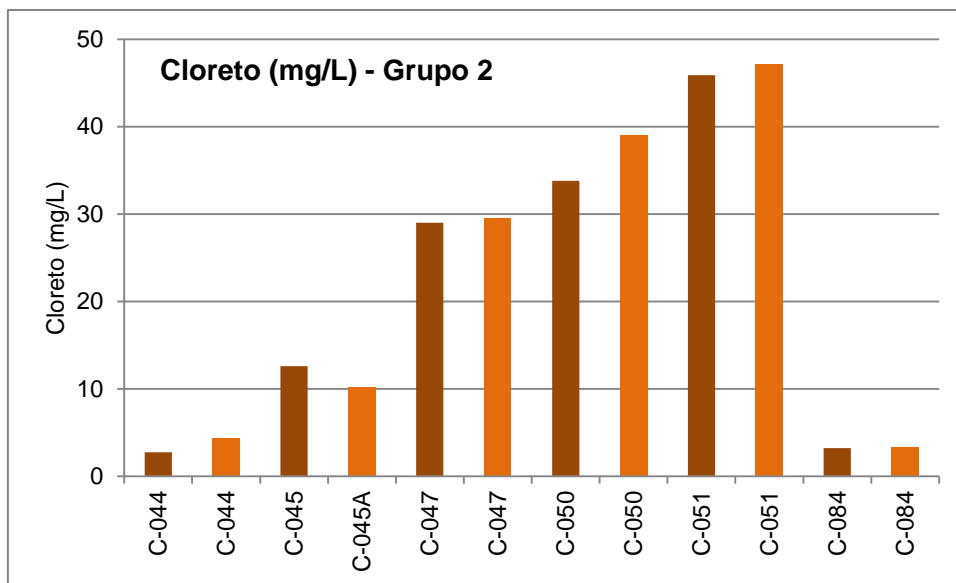


Figura 7.49 - Resultados de Cloreto (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

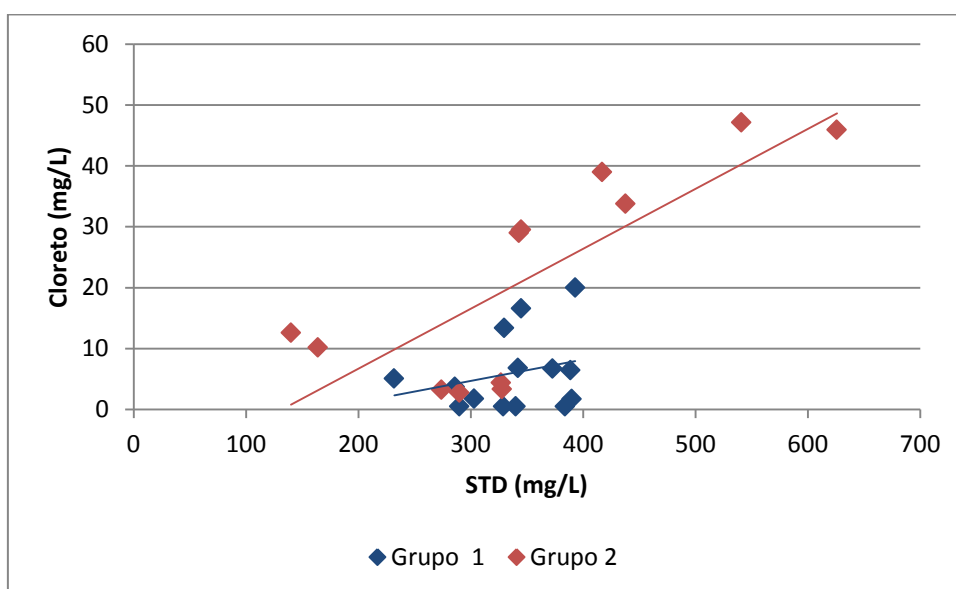


Figura 7.50 – Correlação entre dureza e as concentrações de cálcio em amostras de águas subterrâneas coletadas no período seco para o Grupo 1 e 2, na bacia do Rio do Vieira.

O sódio é outro parâmetro utilizado para mostrar a evolução das águas subterrâneas dos dois grupos, na área piloto do Vieira. Nota-se que os teores de sódio nas águas dos poços do Grupo 2 (**Figura 7.52**) são mais expressivos do que o Grupo 1 (**Figura 7.51**). Segue, portanto, o mesmo comportamento do cloreto, em que ficam constados que os teores baixos do sódio estão nas áreas de recargas, e os mais elevados nas áreas de descargas. As razões desses comportamentos são similares às comentadas na interpretação do cloreto para os dois grupos de poços

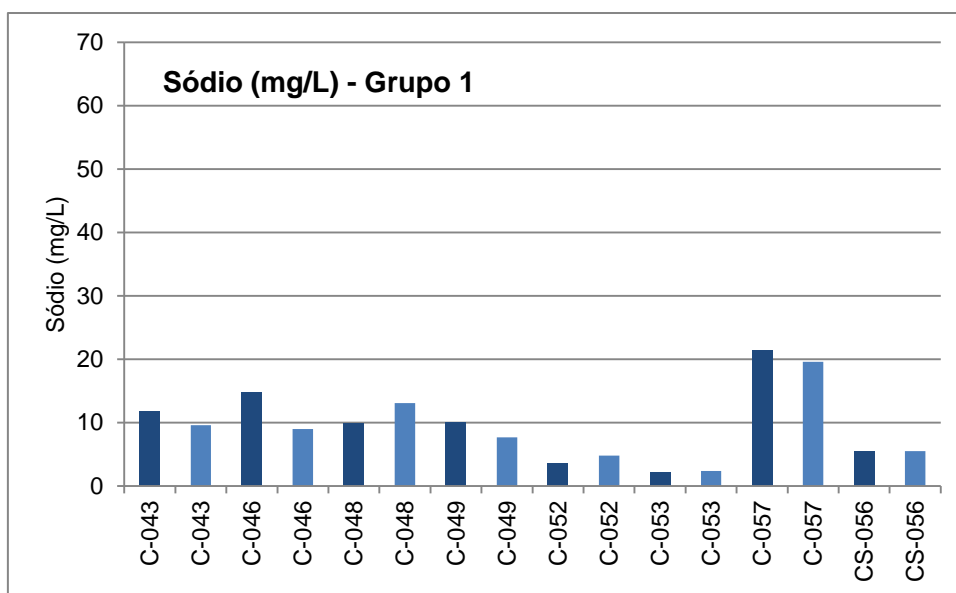


Figura 7.51 - Resultados de Sódio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

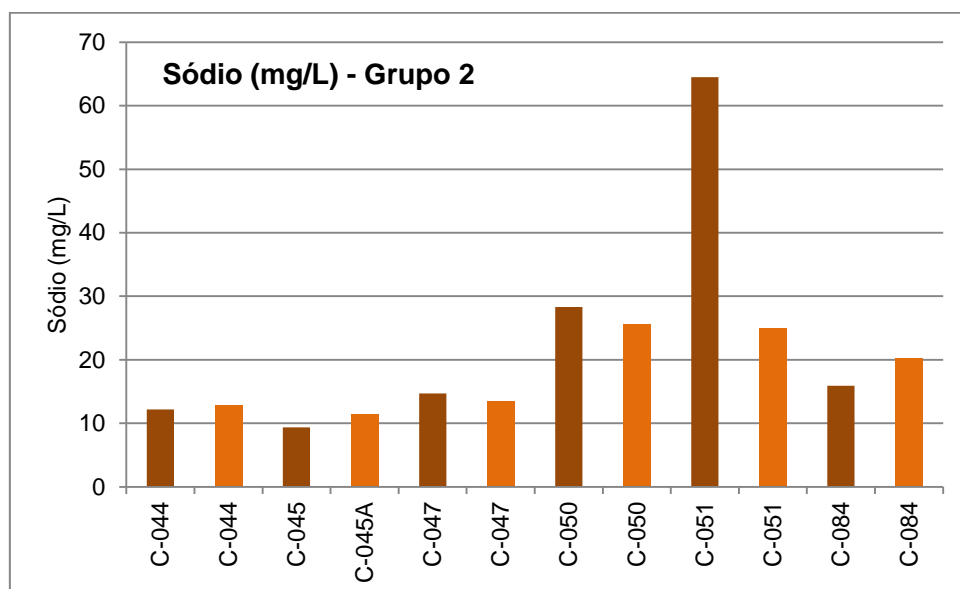


Figura 7.52 - Resultados de Sódio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

c) Indicadores antrópicos:

Como indicadores de vinculação às atividades humanas (fatores antropogênicos) serão usados os parâmetros nitrato e potássio. O primeiro comumente utilizado com indicativos de contaminação de efluente domésticos, enquanto que o segundo está relacionado aos fertilizantes usados na jardinagem.

Os teores de nitrato nas águas do Grupo1 são baixos e próximos ao limite de detecção do método de análise. Exceção, caso isolado do poço C-052 (Distrito Nova Esperança), que apresenta nitrato um pouco acima de 4,0 mg/L N, em ambos os períodos de coleta. É importante ressaltar que os poços do Grupo 1 estão inseridos numa área em que a influência antrópica se mostra bastante minimizada (**Figura 7.53**).

Em relação ao Grupo 2, os poços situados na parte urbana da cidade de Montes Claros, nota-se que os teores de nitrato estão mais elevados do que o Grupo 1 (**Figura 7.54**). Acrescenta-se que os poços C-45 A e C-47, situados no centro da cidade estão mais propensos aos fatores antrópicos do que os poços mais distantes do centro da cidade de Montes Claros, conforme mostra as **Figuras 7.54 e 7.55**.

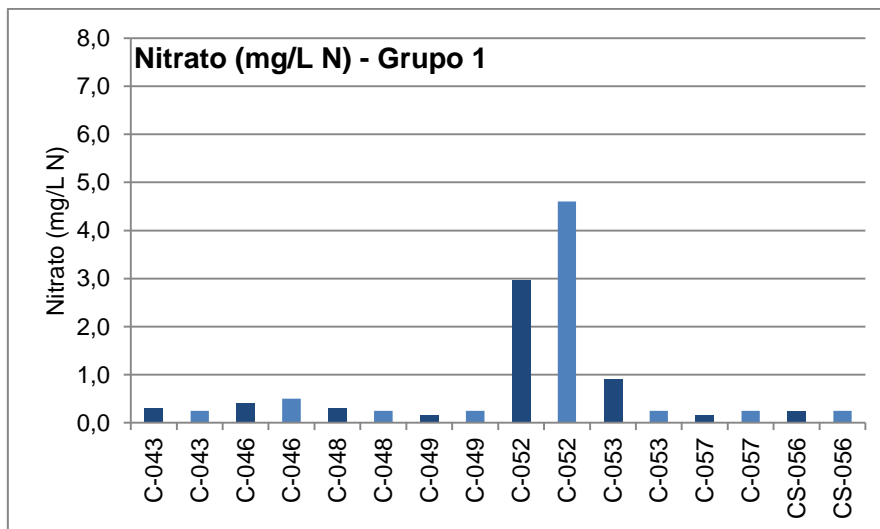


Figura 7.53 - Resultados de Nitrato (mg/L N) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

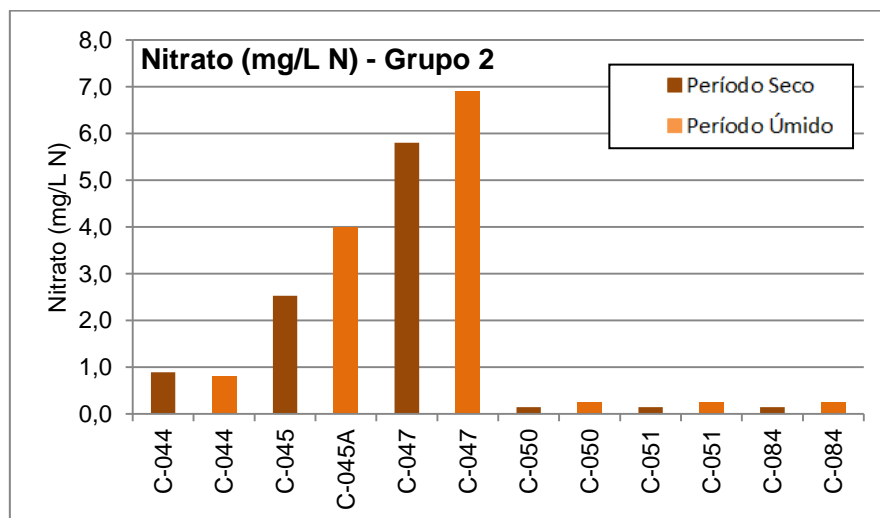


Figura 7.54 - Resultados de Nitrato (mg/L N) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

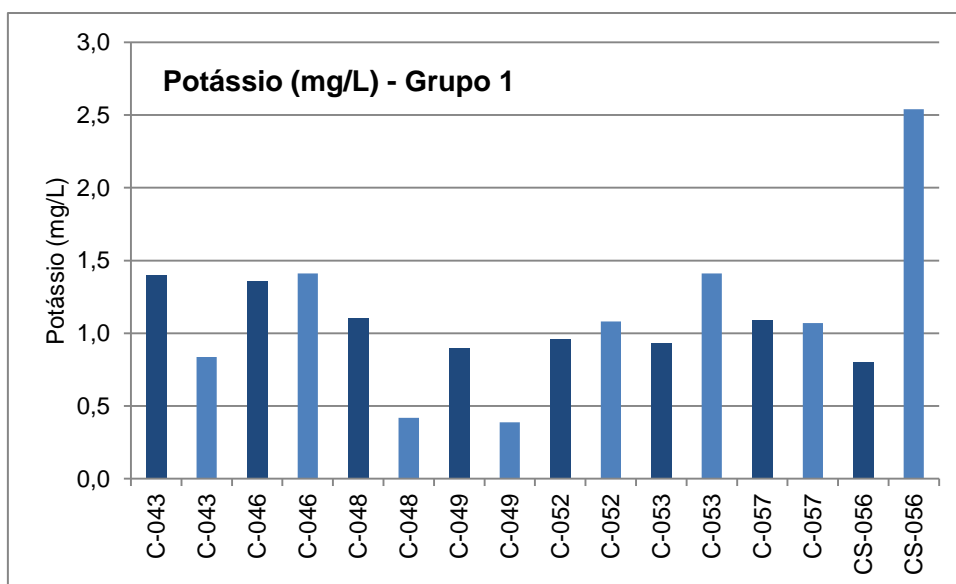


Figura 7.56 - Resultados de Potássio (mg/L) das águas do Grupo 1 na bacia do Rio do Vieira. Azul escuro = período seco. Azul claro = período úmido.

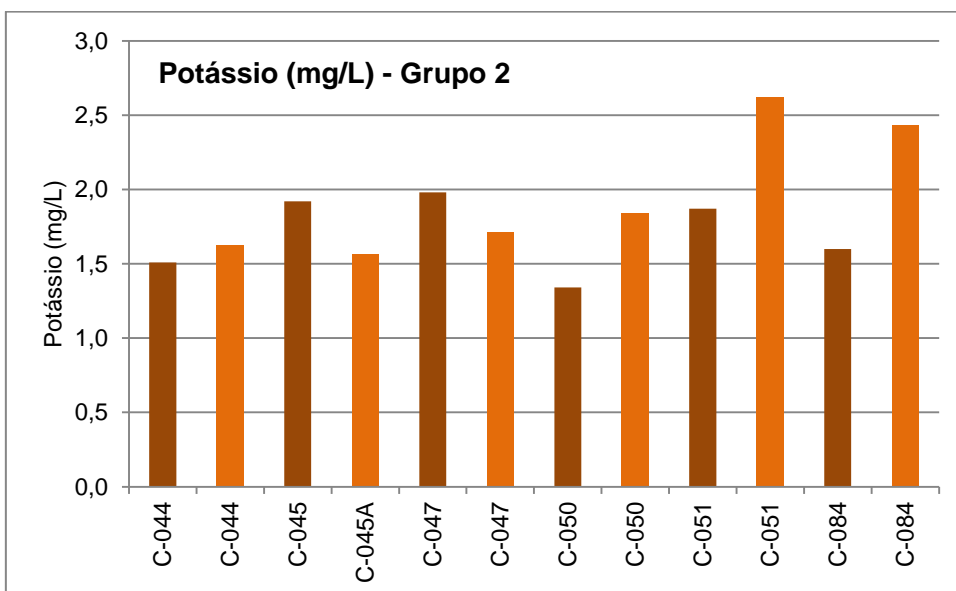


Figura 7.57 - Resultados de Potássio (mg/L) das águas do Grupo 2 na bacia do Rio do Vieira. Laranja escuro = período seco. Laranja claro = período úmido.

7.3.3 Fácies hidroquímicas

Nas **Figuras 7.58 e 7.59** (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.

As mesmas amostras estão também representadas em diagramas de Stiff (Stiff 1951) nas **Figuras 7.60 e 7.61** (período seco e período úmido, respectivamente). A espacialização dos diagramas de Stiff permite uma avaliação das quantidades relativas de íons principais dissolvidos nas águas.

As águas do Grupo 1 são bicarbonatadas cálcicas em ambas as campanhas de amostragem. A amostra superficial da surgência do Rebentão dos Ferros tem a

mesma fácies hidroquímica. As águas do Grupo 2 tendem a serem bicarbonatadas mistas.

A **Tabela 7.12** apresenta as fácies hidroquímicas das águas amostradas. O componente bicarbonatado, assim como o cálcico e o magnesiano, é característico dos aquíferos cársticos, e reflete a presença dos minerais calcita e dolomita nas rochas. Nas águas do Grupo 2 o aporte cloretado e sódico deve refletir os efeitos antropogênicos no quimismo natural das águas, sobretudo relacionado a processos de troca catiônica no caso dos cátions.

Fica bem caracterizada a nítida diferença de composição das águas entre os dois grupos. Mostrando, principalmente, o caráter mais bicarbonatado do Grupo 1 em relação ao Grupo 2.

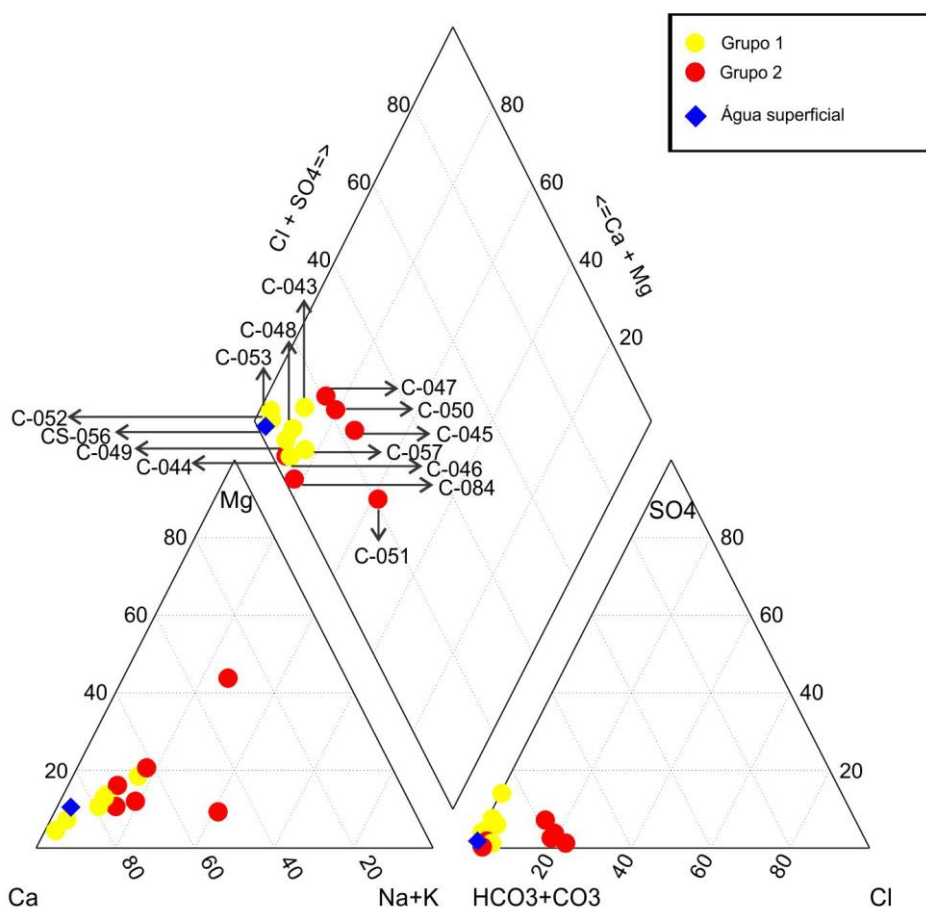


Figura 7.58 – Diagrama de Piper das amostras dos grupos 1 e 2 coletadas na Bacia do Rio do Vieira no período seco.

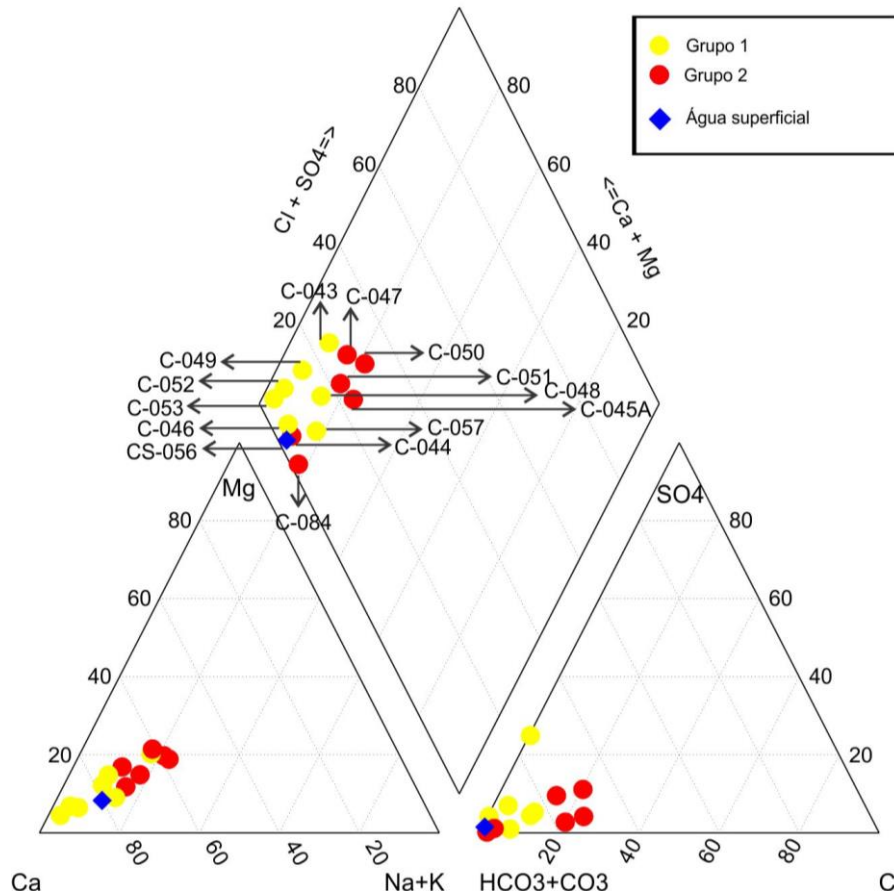


Figura 7.59 – Diagrama de Piper das amostras dos grupos 1 e 2 coletadas na Bacia do Rio do Vieira no período úmido.

Tabela 7.12 – Classificação das águas avaliadas na Bacia do Rio do Vieira.

	ID	Amostra	Período seco	Período úmido
			Fácies	Fácies
Grupo 1	C-043	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃ -SO ₄
	C-046	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-048	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-049	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-052	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-053	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-057	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
Grupo 2	C-044	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
	C-045	Subterrânea	Mg-Ca-Na-HCO ₃	-
	C-045A	Subterrânea	-	Ca-Na-Mg-HCO ₃
	C-047	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃ -Cl
	C-050	Subterrânea	Ca-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃
	C-051	Subterrânea	Ca-Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃ -Cl
	C-084	Subterrânea	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
-	CS-056	Superficial	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃

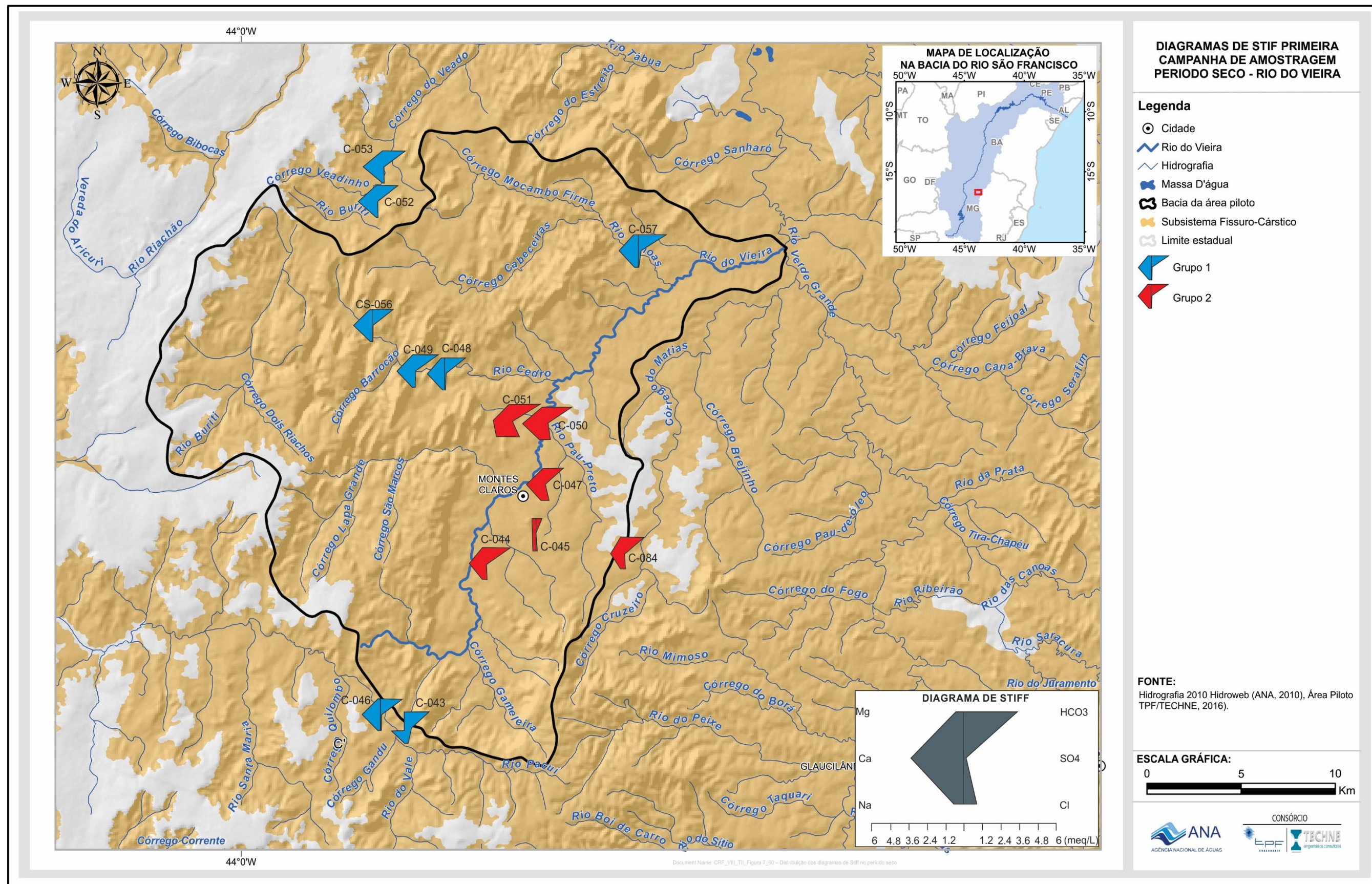


Figura 7.60 – Distribuição dos diagramas de Stiff no período seco.

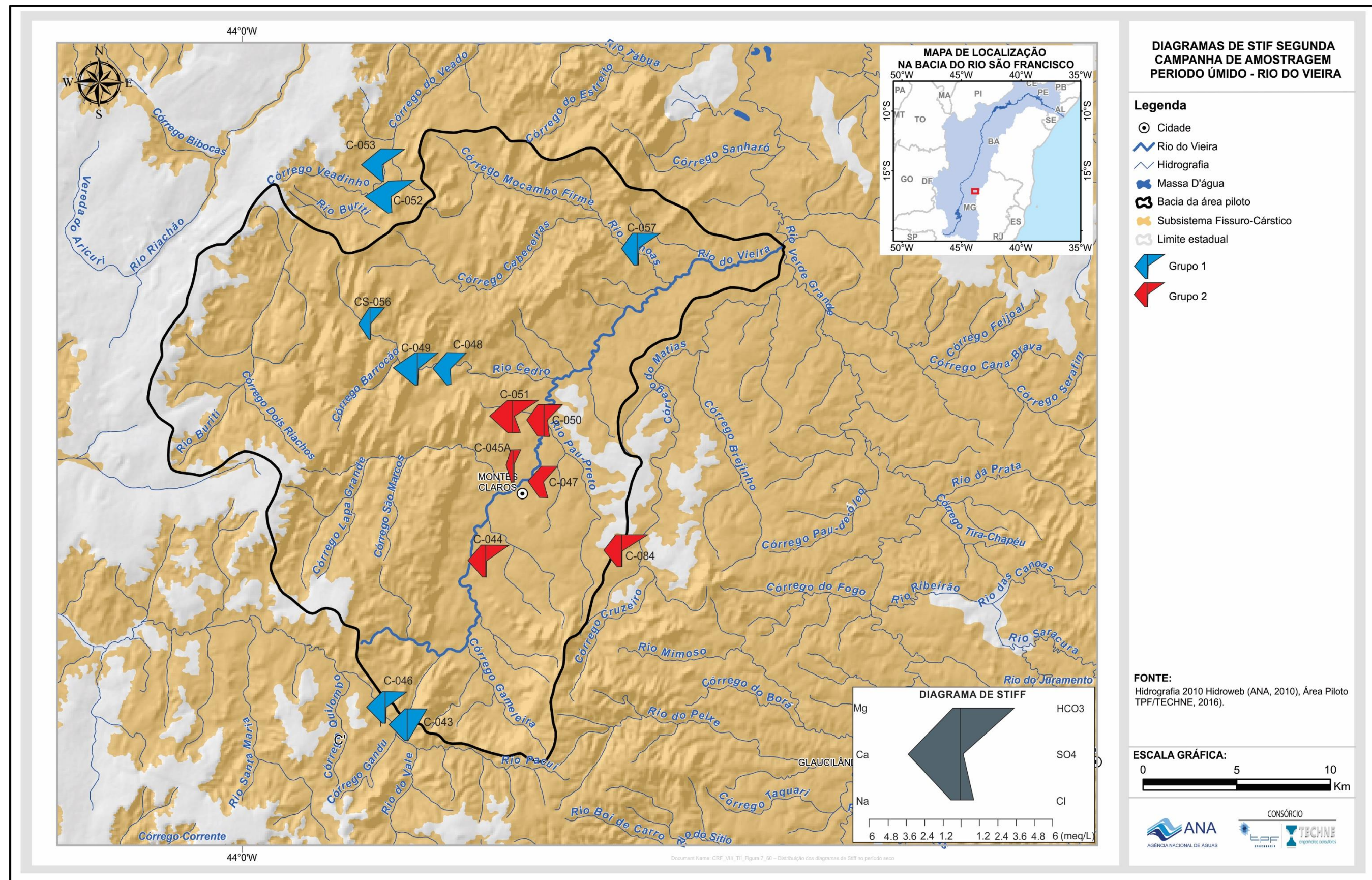


Figura 7.61 – Distribuição dos diagramas de Stiff no período úmido.

7.3.4 Parâmetros Específicos

7.3.4.1 Metais Pesados

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

Na bacia do Rio do Vieira foram selecionados 12 pontos de coleta para determinação de metais pesados. Para os parâmetros cádmio, cromo, mercúrio e níquel todos os resultados foram abaixo do limite de detecção (<0,001) e para os demais parâmetros (arsênio, boro, bário, chumbo, cobre e zinco) foram detectados apenas traços, cujos resultados estão apresentados na **Tabela 7.13**.

Tabela 7.13 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L).

ID	Localidade	Arsênio	Boro	Bário	Chumbo	Cobre	Zinco
C-043	Fazenda Santa Bárbara II	< 0,001	< 0,001	0,00564	< 0,001	< 0,001	0,00212
C-044	-	< 0,001	< 0,001	0,00882	< 0,001	< 0,001	0,00318
C-045A	Garagem da Contijo	< 0,001	< 0,001	0,0155	< 0,001	< 0,001	0,0198
C-046	Fazenda Santa Bárbara II	0,00103	< 0,001	0,00829	0,00163	0,00126	0,0256
C-047	Garagem da Contijo	< 0,001	< 0,001	0,0224	< 0,001	0,00136	0,0193
C-048	Rebentão dos Ferros	< 0,001	0,0441	0,0272	0,00337	0,0139	0,0044
C-049	Rebentão dos Ferros	< 0,001	0,00922	0,0274	< 0,001	< 0,001	0,0035
C-050	ETE – COPASA	< 0,001	0,00963	0,0263	< 0,001	0,00235	0,195
C-051	ETE – COPASA	< 0,001	0,101	0,0417	< 0,001	< 0,001	0,00683
C-052	Fazenda Nova Esperança	< 0,001	< 0,001	0,025	< 0,001	< 0,001	0,226
C-053	Fazenda Camarins	< 0,001	< 0,001	0,0246	< 0,001	< 0,001	< 0,001
C-057	Comunidade Canoas	< 0,001	< 0,001	0,042	< 0,001	0,00526	0,0132

* Os parâmetros cádmio, cromo, mercúrio e níquel não estão apresentados na tabela porque todos os resultados foram abaixo do LD

7.3.4.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 2 amostras de águas subterrâneas na bacia do Rio do Vieira, conforme Tabela 7.14. Os pontos destinados às análises de agroquímicos estão localizados em áreas agrícolas potencialmente sob influência do uso de fertilizantes e pesticidas.

Foram avaliados 43 agroquímicos, elencados no item 7.1 do presente relatório. A seleção dos compostos analisados foi realizada mediante o cadastramento das principais culturas agrícolas existentes na área, e posterior levantamento em campo e em instituições, dos princípios agroquímicos empregados.

Nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de detecção. A não detecção desses compostos pode denotar a sua inexistência ou a presença em quantidades muito reduzidas. Convém ressaltar, que no aquífero 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 a permanência desses agroquímicos nas camadas superficiais do solo, que dificultam ou impedem a sua lixiviação até a zona saturada.

Ainda, a presença de resíduo de agroquímicos nas águas subterrâneas depende de variáveis ambientais, como a quantidade de matéria orgânica no solo que absorve grande parte dos compostos orgânicos não polares, impedindo que estes cheguem ao lençol freático por lixiviação; e depende também da textura e da porosidade que determinam a capacidade do solo reter ou não a solução no solo.

Tabela 7.14 – Pontos de coleta para agroquímicos.

ID	Localidade
C-053	Fazenda Camarins
C-057	Comunidade Canoas

7.3.4.3 Derivados de Petróleo

Na avaliação desses compostos foram selecionados poços para a investigação de eventuais ocorrências de contaminantes em áreas no entorno de fontes potenciais de contaminação.

Foram avaliados os parâmetros benzeno, etilbenzeno, tolueno, m, p-xilenos, o-xileno, xilenos e índice de fenóis. Para avaliação desses compostos foram analisadas 12 amostras (**Tabela 7.15**) na bacia do Rio do Vieira e nenhum dos parâmetros analisados apresentou concentração superior ao limite de detecção.

Os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) podem estar presentes nas águas contaminadas, principalmente, por vazamentos de combustível de tanques subterrâneos. Os pátios de armazenagem de derivados de petróleo, oleodutos, garagens e oficinas mecânicas que manipulam derivados de petróleo são fontes potenciais de contaminação por esses compostos. Quando liberados no ambiente, eles podem volatilizar, dissolver ou serem adsorvidos pelas partículas do solo. Quando aderidos ao solo, a sua percolação para a zona saturada é lenta e na presença oxigênio eles podem ser biologicamente degradados.

Os fenóis podem aparecer em águas naturais através de descarga de efluentes industriais e da presença de pesticidas com estrutura fenólica. São compostos persistentes a biodegradação e de alta toxicidade ao homem e aos organismos aquáticos.

Tabela 7.15 – Pontos de coleta para derivados de petróleo

ID	Localidade
C-043	Fazenda Santa Bárbara II
C-044	-
C-045A	Garagem da Contijo
C-046	Fazenda Santa Bárbara II
C-047	Garagem da Contijo
C-048	Rebentão dos Ferros
C-049	Rebentão dos Ferros
C-050	ETE – COPASA
C-051	ETE – COPASA
C-052	Fazenda Nova Esperança
C-053	Fazenda Camarins
C-057	Comunidade Canoas

7.3.5 Qualidade das Águas para o Consumo Humano

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

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 7.16** (substâncias químicas que representam risco à saúde) e **Tabela 7.17** (substâncias organolépticas).

Tabela 7.16 - 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 7.17 - 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 apenas os parâmetros ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano. Devido esse cenário, a seguir são relatadas algumas considerações a respeito desses parâmetros das águas avaliadas.

7.3.6 Fatores controladores do ferro e manganês nas águas

O elemento ferro é um importante constituinte de rochas e solos. Praticamente todas as águas contêm um pouco de ferro, e concentrações de alguns décimos de miligramas por litro limitam, algumas vezes, a utilização da água tanto para uso doméstico quanto industrial. Por essa razão o ferro é um elemento importante na análise de água (Hem, 1986).

A química do ferro na água é complexa. Duas espécies de cátions de ferro ocorrem comumente, os tipos: ferroso (Fe⁺²) e férrico (Fe⁺³). O estado ferroso é instável na presença do oxigênio do ar, mudando para o estado férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água. A solubilidade do ferro depende, entre outros fatores, essencialmente do pH, Eh e das concentrações de CO₂ e sulfato (Hem, 1986).

Na **Figura 7.62** é possível observar que todas as amostras de água coletadas nos dois períodos, estão campo do Fe⁺², portanto, solúvel em ambiente de água subterrânea.

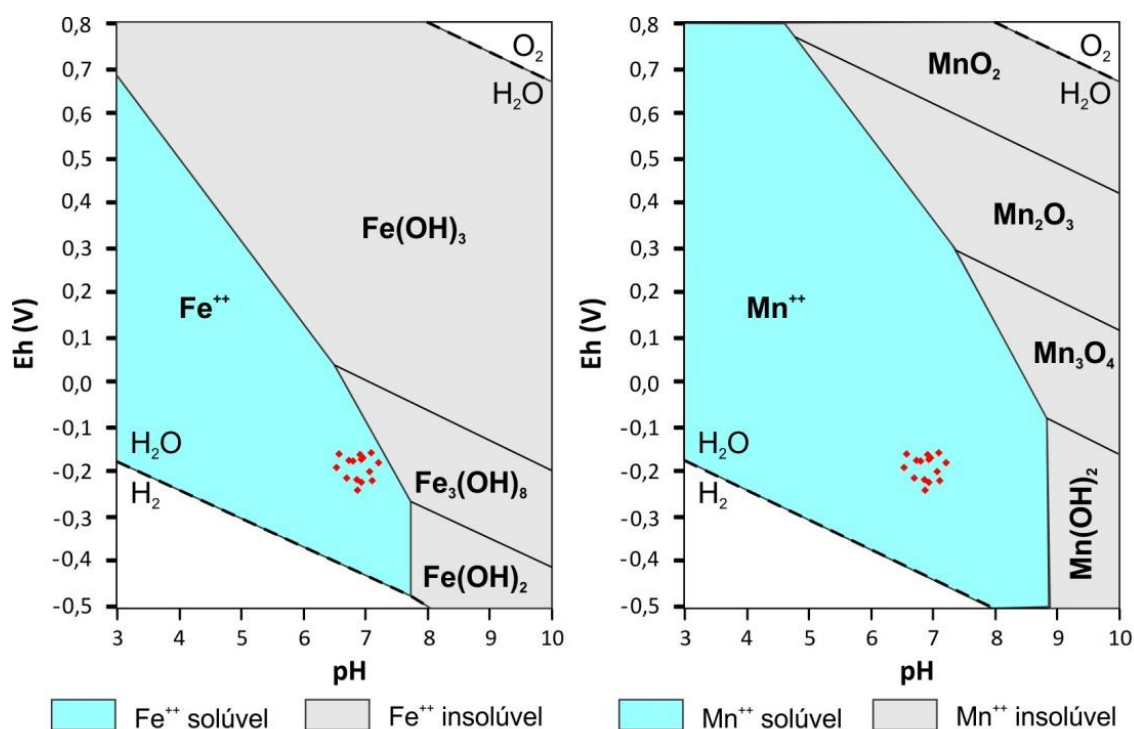


Figura 7.62 - Diagrama Eh-pH com as principais espécies de ferro e manganês, e as amostras coletadas nos períodos seco e úmido plotadas conjuntamente (Figura modificada de Hem, 1986)

De acordo com Hem (1986), nas soluções com valores de Eh e/ou pH baixos a solubilidade do ferro é alta. Ao contrário, para valores altos de Eh e pH a solubilidade do ferro é baixa.

É importante lembrar que nesse item estão sendo discutidas as amostras sem considerar o agrupamento dos poços definidos anteriormente, já que não se percebeu diferenças dos teores de ferro e manganês entre os poços nas áreas de maior ou menor atuação antropogênica. Esse comportamento indica que os dados químicos de dissolução/precipitação do ferro são controlados, principalmente, por processos naturais, como características geogênicas (intemperismos), e dos fatores pH e Eh e em menor escala por aspectos relacionados a urbanização.

Ressalta-se ainda, que o calcário que ocorre na área é de cor predominante cinza escura, intercalados de forma subordinadas por lentes pelíticas, que pode indicar condições de sedimentação redutoras e de intensa atividade orgânica. Produzindo, portanto, condições favoráveis para o enriquecimento dessas águas com relação ao ferro e manganês.

Nas águas amostradas, o comportamento do ferro para os diferentes períodos de amostragem está mostrado nas **Tabelas 7.18 e 7.19** e ilustrado na **Figura 7.63**. Nota-se que houve uma distribuição heterogênea dos teores de íons de ferro, principalmente, no que diz respeito às maiores concentrações, os quais ocorrem no período seco nos poços C-043, C-048, C-050, C-051, C-053 e C-084 e no período úmido período se repetiu apenas nos poços C-48, C-50, C-51, com teores acima de 0,3 mg/L, superiores ao limite da Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL/DOU, 2011).

Tabela 7.18 - Poços amostrados na Bacia do Rio do Vieira, valores de pH, Eh, CO₂ dissolvido, ferro total e manganês, no período seco.

Poço	pH	Eh (mV)	CO ₂ dissolvido	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)
C-043	7,19	-79,2	397,649	0,90	0,7780
C-044	7,15	232	440,592	0,03	0,0036
C-045	6,41	87,2	114,4747	0,03	0,0132
C-046	7,24	195,4	415,078	0,02	0,0153
C-047	6,49	239	339,556	0,04	0,3260
C-048	7,53	-60,1	387,775	5,18	0,4750
C-049	7,45	41,4	437,114	0,04	0,0378
C-050	7,05	-48,8	489,951	1,46	0,7450
C-051	7,07	-167,4	536,012	1,25	0,5130
C-052	6,93	160	362,951	0,02	0,0005
C-053	7,19	177,6	418,306	0,59	0,0439
C-056	7,73	141,3	385,986	0,09	0,0145
C-057	7,5	252,3	526,048	0,01	0,0018
C-083	6,8	166,6	137,1252	0,01	0,0005
C-084	6,73	-31,2	371,096	1,23	0,1730

Tabela 7.19 - Poços amostrados na Bacia do Rio do Vieira, valores de pH, Eh, CO₂ dissolvido, ferro total e manganês, no período úmido.

Poço	pH	Eh (mV)	CO ₂ dissolvido	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)
C-043	6,99	25	356,535	0,108	0,0268
C-044	7,32	228,2	413,409	0,024	0,00272
C-045A	7,27	171,2	144,6002	0,00753	0,0191
C-046	7,21	74,4	388,095	0,129	0,00222
C-047	7,23	138,2	240,298	0,00173	0,29
C-048	7,65	99,2	339,985	0,699	0,0831
C-049	7,4	6,8	435,575	0,189	0,0452
C-050	7,36	-89,2	357,754	2,35	1,08
C-051	7,36	-138	492,819	1,4	0,556
C-052	7,36	182,6	467,395	0,026	< 0.001
C-053	7,6	186,2	424,252	0,0329	0,00301
C-056	7,74	146,9	268,39	0,963	0,0463
C-057	7,14	98,6	440,602	0,146	0,445
C-083	7,72	177,5	188,96	0,021	< 0.001
C-084	7,86	120,4	492,319	0,0603	0,0164

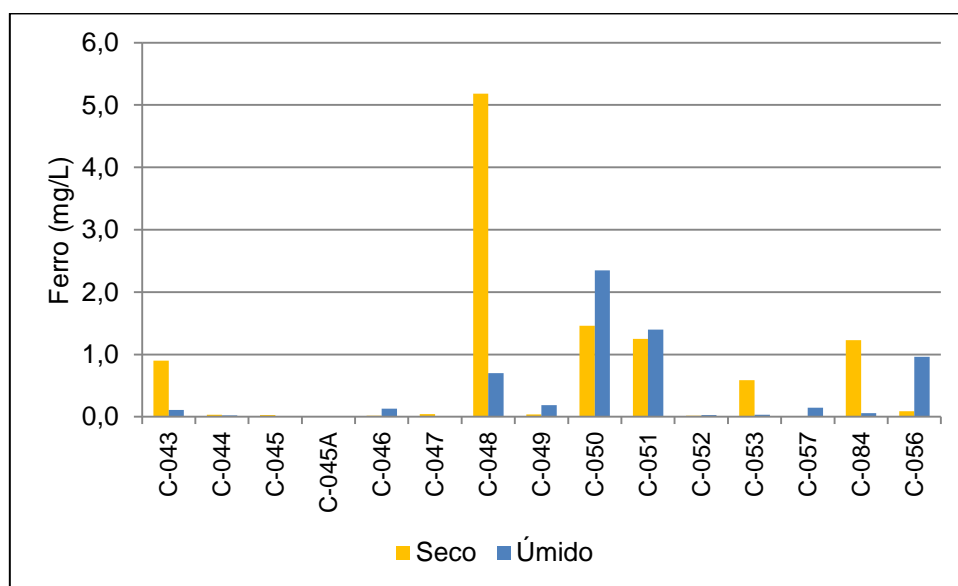


Figura 7.63 - Teor de ferro nas amostras coletadas nos períodos seco e úmido, na Bacia do Rio do Vieira.

Os fatores climáticos como evaporação de água e ausência de recarga inerente ao período seco podem estar influenciando na elevação dos teores de ferro nos poços, associados a valores negativos de Eh, indicando um ambiente redutor para os poços C-043, C-048, C-050, C-051 e C-084.

A queda da concentração de ferro evidenciada, no período chuvoso, nos poços C-048, C-053 e C-084, deve ter ocorrido em função de uma possível precipitação do ferro, decorrente da elevação dos valores de pH. Nesses poços permanece um ambiente redutor, exceto no poço C-053, em que o Eh passa para um valor de 186,2mV, indicando um ambiente oxidante (**Tabelas 7.18 e 7.19**).

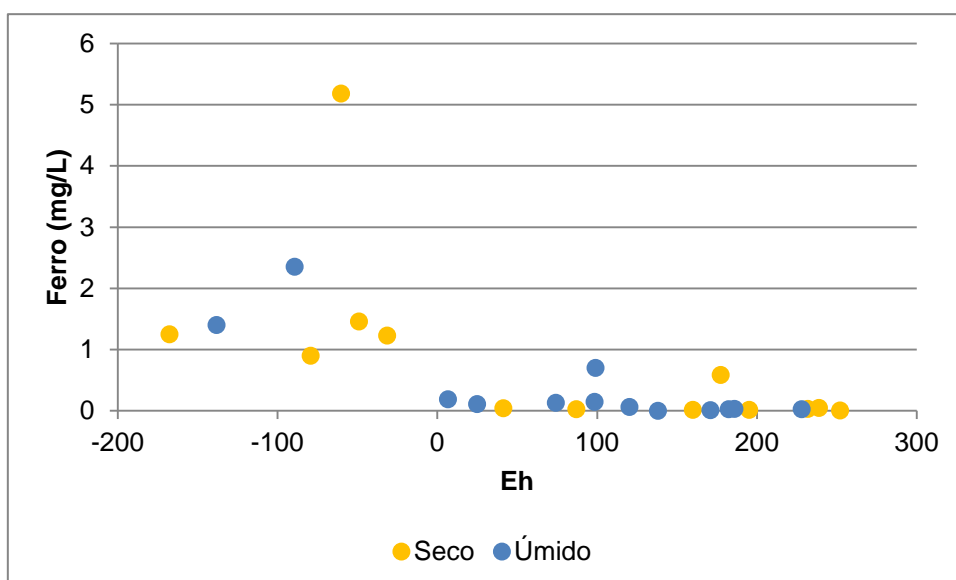
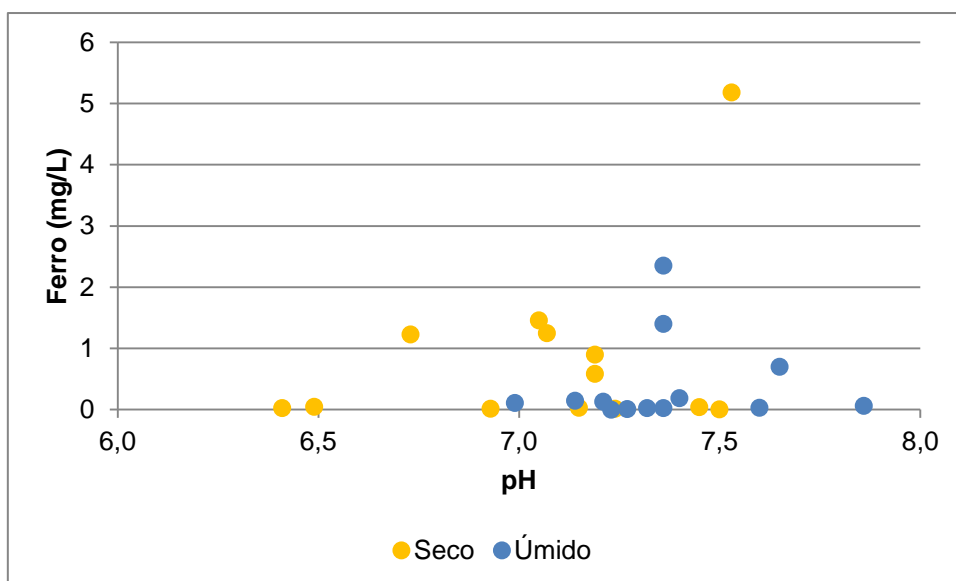
As **Figuras 7.64 e 7.65** correlacionam os teores de ferro com pH e Eh, respectivamente. Observa-se que esses dois parâmetros, especialmente o Eh, influenciam na concentração de ferro na água. É interessante observar que todas as amostras com valores negativos de Eh, em ambiente redutor, apresentam valores de ferro superiores a 0,9 mg/L. Em relação ao pH nota-se que os valores anômalos de ferro ocorrem principalmente no campo alcalino.

Os valores de CO₂ dissolvidos, calculados a partir da relação $CO_2 = 6 - pH + 1,589 \times HCO_3$ (Custodio & Llamas, 1983), se mostraram superiores a 100 mg/L (**Tabelas 7.17 e 7.18**). Não foi constatada, entretanto, uma relação clara entre os teores de CO₂ e de ferro na água, indicando que, por si só, esse parâmetro não é decisivo para a presença de ferro nas águas amostradas.

Outro fator que pode, também, estar influenciando no teor de ferro na água dos poços amostrados, se refere às características construtivas dos poços, principalmente, nos aspectos de revestimento e de setores da bomba em que a água fica em contato.

O manganês se assemelha quimicamente ao ferro no seu 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. Ocorre principalmente sob a forma de Mn⁺² podendo também ocorrer como Mn⁺³. O manganês Mn⁺² é instável na presença do ar, mudando o estado MnO₂, quando a água que o contém é exposta ao ar, pois se oxida facilmente (Feitosa *et al*, 2008). Nas águas amostradas a espécie predominante é o Mn⁺² (**Figura 7.62**), portanto, solúvel, devido as condições de pH e Eh nas águas subterrânea da área.

Nos poços amostrados os maiores valores de manganês, nos dois períodos de coleta, ocorrem nas mesmas condições ambientais que os teores mais elevados do ferro, seja com pH básico e Eh no meio redutor (**Tabelas 7.18 e 7.19**). Atingindo, por vezes, teores de 1,05 (C-050), no período úmido. Valores mais altos de manganês, acima de 0,4 mg/L, com máximo de 1,08 mg/L, ocorrem tanto no período seco, como no úmido (**Figura 7.66**). As concentrações de manganês, portanto, parecem não ser influenciados pela sazonalidade do clima, e sim controladas pelos parâmetros Eh e pH do meio.



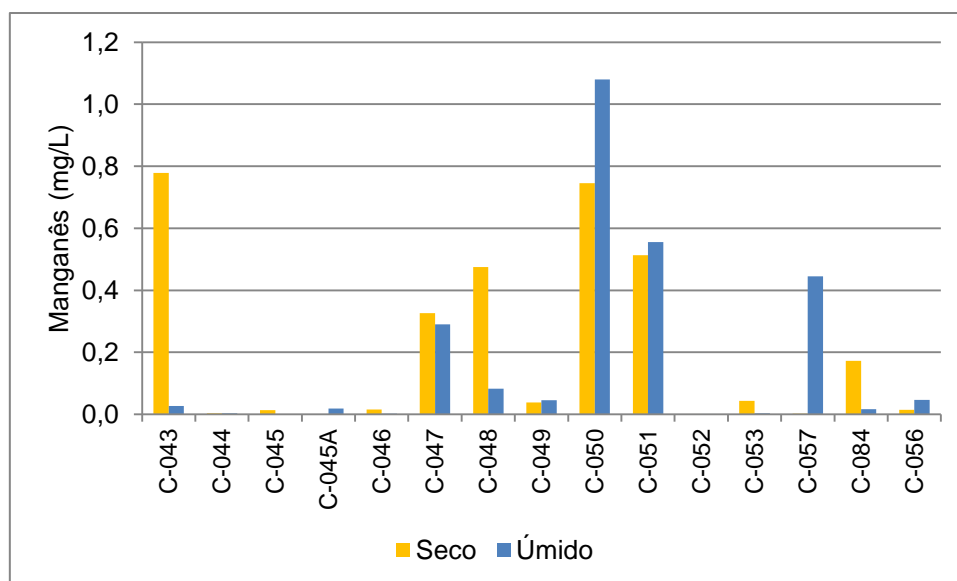


Figura 7.66 - Teor de manganês nas amostras coletadas nos períodos seco e úmido, na Bacia do Rio do Vieira.

7.4 Considerações Finais

O aquífero Bambuí na bacia do Rio do Vieira apresenta águas pouco mineralizadas, com sólidos totais dissolvidos inferiores a 700 mg/L, portanto, classificadas como Doces e toleráveis para o consumo humano. Os resultados de pH apresentam valores oscilando desde levemente ácidos a levemente alcalinos, com média e mediana em torno de 7,0. A dureza dessas águas varia de pouco a muito dura, com predominância de águas muito duras (>200 mg/L).

O efeito da sazonalidade climática não se reflete na hidroquímica das amostras avaliadas, na medida em que não se observa variação nos resultados analíticos em função do período amostral (seco e úmido).

Evidenciou-se a existência de dois ambientes hidroquímicos distintos, agrupados da seguinte forma:

Grupo 1: Química da água é decorrente de fatores geogênicos, relacionados com a composição litológica predominante de calcários de coloração preto a cinza, com eventual presença de falhas, dolinas e cavidades que propiciam uma rápida renovação e circulação da água de infiltração. Essas águas são bicarbonatadas cálcicas com pH levemente alcalino.

Grupo 2: Química da água reflete o componente geológico do aquífero juntamente com fatores antropogênicos. Do ponto de vista geológico a presença de camadas de siltitos e pelitos intercaladas nos calcários pode estar propiciando o decréscimo de cálcio, bicarbonato e do pH, em relação ao Grupo 1. A influência antropogênica, mesmo não se refletindo fortemente, é possivelmente denotada pelo teor mais elevado de sódio, cloreto e nitrato nesse grupo.

As amostras selecionadas para análises de parâmetros específicos (metais pesados, agroquímicos e derivados de petróleo) apresentam em todos os casos valores inferiores ao máximo permitido pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. Em relação aos agroquímicos e derivados de petróleo os valores apresentaram-se abaixo do limite de detecção para todas as amostras,

e no caso dos metais arsênio, boro, bário, chumbo, cobre e zinco foram detectados apenas traços. Apenas os parâmetros ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras.

8. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Na avaliação da vulnerabilidade foi utilizada uma adaptação da metodologia do EPIK (Doerfliger, 1998) considerando os seguintes parâmetros: Epicarste (E), Cobertura de Proteção (P), Condições de infiltração (I) e Grau de Desenvolvimento da Rede Cárstica (K). A aplicação dessa metodologia demandou a criação prévia de uma base de dados que auxiliou na análise de todas as possíveis classificações atribuídas aos parâmetros E, P, I e K.

Para a atribuição de classes aos parâmetros I e K foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para se fazer a classificação desses parâmetros por unidade geológica, verificando em qual classe (I1, I2, etc, ou K1, K2, etc) se enquadrava cada uma dessas unidades.

Para a atribuição de classes ao parâmetro P foram utilizados perfis litológicos existentes na base de dados.

Após a atribuição de classes a cada parâmetro, os mesmos são zoneados em mapas. Em seguida, consideram-se pesos diferentes para cada parâmetro (3 para o E, 1 para o P, 3 para o I e 2 para o K), e realiza-se a soma através da técnica álgebra de mapas. Foram definidas, dessa forma, áreas de vulnerabilidade classificadas como alta, média e baixa.

Nos estudos de vulnerabilidade se lida com os conceitos de risco de contaminação e perigo de contaminação. O primeiro diz respeito à possibilidade potencial de contaminação, sem considerar a existência concreta de fontes contaminantes. O risco de contaminação está intimamente associado à vulnerabilidade, pois, quanto maior for esta, maior será o risco de contaminação.

O perigo de contaminação, por sua vez, implica a existência concreta de fontes contaminantes. Segundo Foster *et al.*, (2006), o perigo de contaminação de um aquífero se avalia a partir da interação entre:

- As cargas contaminantes aplicadas ou potencialmente aplicáveis ao meio ambiente como resultado de atividades humanas.
- A vulnerabilidade do aquífero à contaminação, que depende das características geológicas e hidrogeológicas do aquífero e do seu recobrimento.

As cargas contaminantes são classificadas de acordo com o método POSH (*Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically*) (Foster *et al.*, 2002), com base na origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica. São considerados, neste método, três níveis qualitativos de geração de carga contaminante: reduzido, moderado e elevado. A interação entre esses níveis e as diferentes classes de vulnerabilidade resulta na classificação do perigo de contaminação, segundo a Tabela 1.1 abaixo.

Tabela 1.1 – Relação entre os métodos POSH e EPIK modificado

Perigo à contaminação		Vulnerabilidade - EPIK adaptado		
		Baixa	Média	Alta
POSH	Reduzido	Muito baixo	Baixo	Baixo
	Moderado	Baixo	Moderado	Alto
	Elevado	Moderado	Alto	Extremo

Assim sendo, o perigo de contaminação foi avaliado sobrepondo-se os resultados do cadastro de cargas contaminantes ao mapa de vulnerabilidade. Esta sobreposição informa sobre a distribuição das zonas onde há perigo de contaminação.

Foi criada uma base de dados que auxiliou a análise de todas as possíveis classificações atribuídas para os parâmetros E, P, I e K. Os dados utilizados serão descritos a seguir, juntamente com a descrição da classificação para cada parâmetro e o cruzamento das informações para geração do mapa de vulnerabilidade do domínio IV.

8.1 Classificação a partir do parâmetro: Epicarste (E)

Para a classificação da área piloto a partir do parâmetro E foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para a realização da classificação da área, analisando em qual classe (E1, E2, E3) se enquadraria cada unidade geológica.

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

Como pode ser observada na Figura 8.1, a classe epicarste franco foi classificada na maior parte da área, totalizando 94% do total, enquanto 6% da área foi classificada como epicarste encoberto e mostra o mapa com o resultado da classificação para este parâmetro. Do mapa verifica-se que essa área piloto é toda de relevo cárstico. Em sua maioria (94%), a região é composta por afloramentos de rocha calcária, com ocorrência de dolinas e cavidades em toda extensão, o que a caracteriza como mais vulnerável. Isso pode ser comprovado analisando a Figura 4.32 (mapa de estruturas de carstificação) apresentada no capítulo 4. As regiões de epicarste encoberto tem uma classificação intermediária e estão em apenas 6% da área.

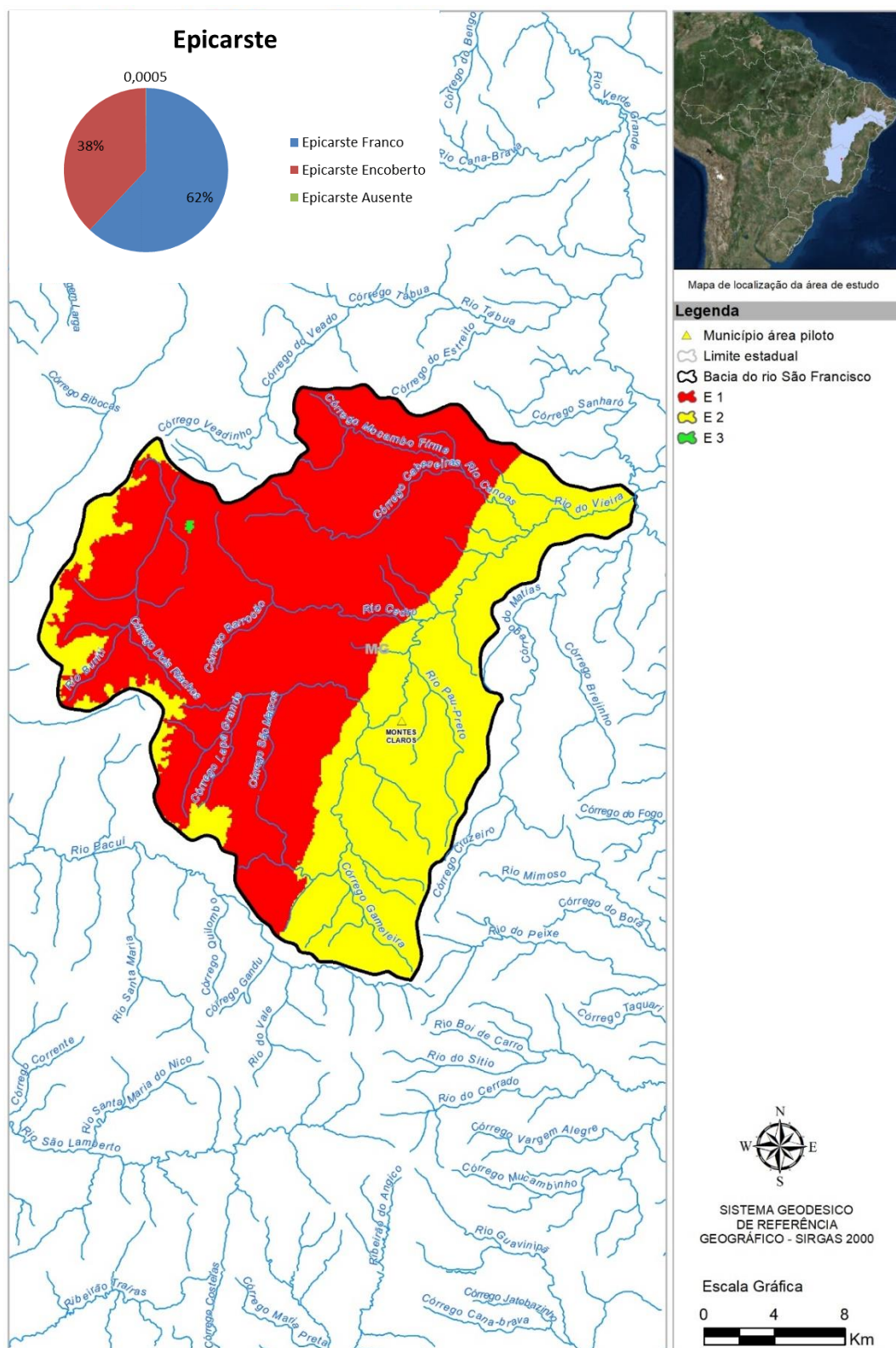


Figura 8.1: Parâmetro E – Epicarste.

8.2 Classificação a partir do parâmetro: Cobertura de Proteção (P)

Para a classificação da área piloto a partir do parâmetro P foram utilizados inicialmente os perfis de 203 poços perfurados na região do carste (sendo nove na área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira). Estes perfis apresentaram informações sobre a litologia em variadas profundidades, sendo suficiente para a classificação necessária.

Entretanto, o resultado foram 203 pontos classificados quanto a sua cobertura de proteção, o que tornou necessária a realização de uma interpolação espacial para a geração de valores para toda a área do carste (a fim de aproveitar o máximo de pontos possíveis).

Assim, foi utilizado o método ponderação do inverso da distância (IDW), que gerou uma grade regular onde cada elemento da matriz *raster* está associado a um valor numérico interpolado a partir dos valores atribuídos para os poços. Essa grade foi recortada apenas para a área piloto e reclassificada nas três classes definidas: valor 1, valor 2 e valor 3, conforme metodologia apresentada no Volume II.

Como pode ser observada na Figura 8.2, a classe P2 foi classificada em 80% da área total, P1 em 19% e P3 em apenas 1% e o mapa com o resultado da classificação para este parâmetro. De acordo com o mapa, essa área piloto apresenta as três classificações de cobertura de proteção, sendo as partes vermelhas (19%) a mais vulnerável, ou seja, com cobertura ausente ou de pouca espessura, o que deixa a rocha mais sujeita a diversos tipos de impactos. Nas áreas amarelas do mapa (80%), predomina a vulnerabilidade intermediária, o que se justifica pela presença de materiais arenosos intercalados a solos silto-arenosos com espessura não superior a 10m. A área verde no mapa (apenas 1%) é aquela onde o solo está mais protegido, correspondendo a uma parte da área urbana de Montes Claros.

É válido lembrar que a proteção do solo é um parâmetro dinâmico, sendo que áreas compreendidas por florestas, por exemplo, podem ser devastadas expondo o carste, e áreas onde existe o afloramento direto podem vir a serem cobertas novamente, por reflorestamento ou mesmo aterradas para dar lugar a construções de todos os tipos e níveis. Assim, esse parâmetro deve ser sempre monitorado quando da avaliação da vulnerabilidade do carste.

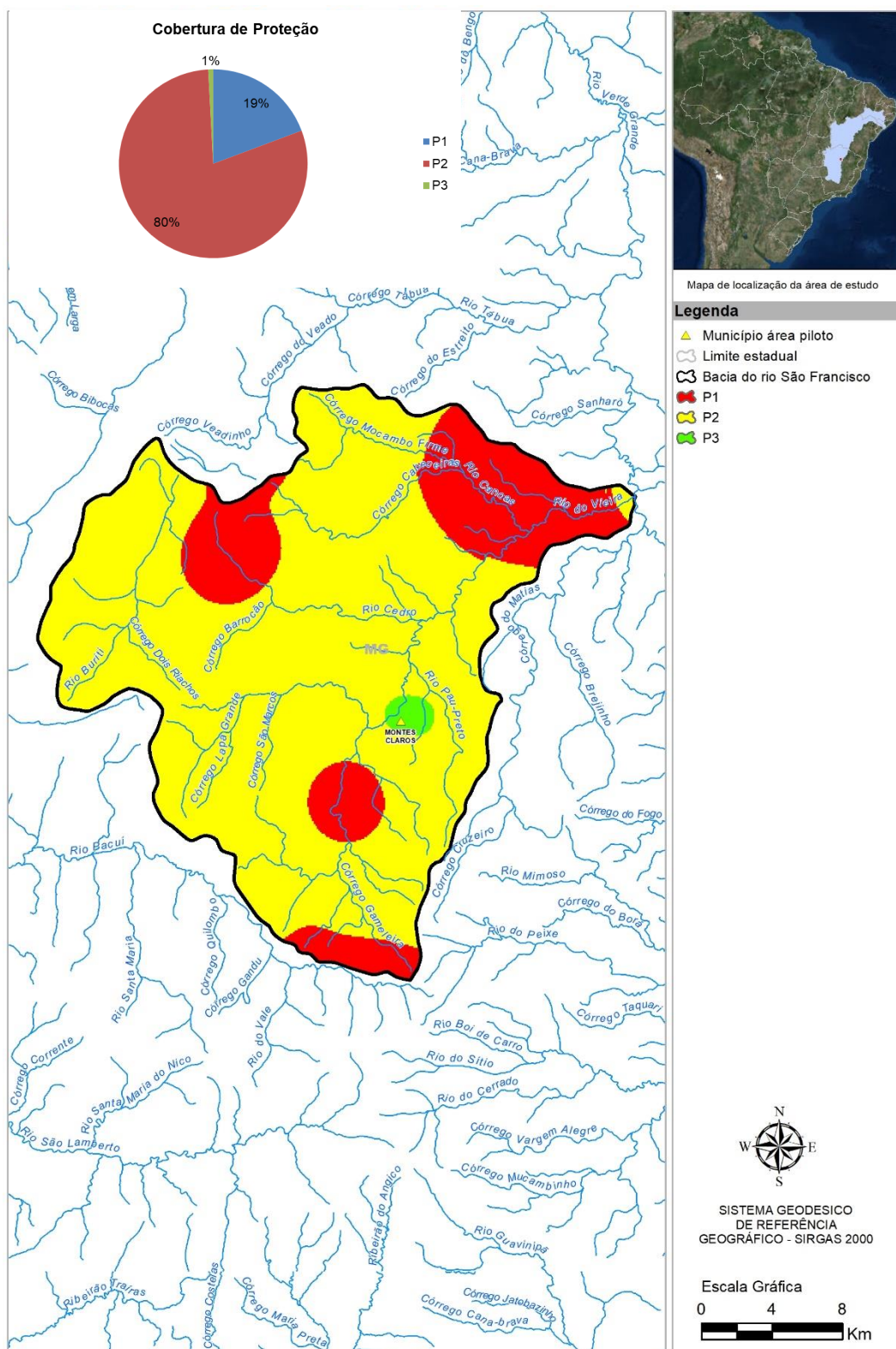


Figura 8.2: Parâmetro P: cobertura de proteção.

8.3 Classificação a partir do parâmetro: Condições de infiltração (I)

Para a classificação da área piloto a partir do parâmetro I foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para a realização da classificação da área, analisando em qual classe (I1, I2, I3) se enquadraria cada unidade geológica, conforme metodologia apresentada no Volume II, TOMO 2.

O parâmetro Condições de infiltração (I) no sistema cárstico é um dos mais importantes, na aplicação do EPIK adaptado, e o que apresenta o maior grau de atenção quando da avaliação da vulnerabilidade do carste, já que lida com a entrada de água no sistema. As águas que são injetadas no sistema cárstico estão sujeitas a quaisquer tipos de contaminantes e pode afetar rapidamente o aquífero, já que a velocidade de dispersão em meios cársticos é muito rápida (Ford & Willams, 2007). Para este parâmetro outro fator importante de análise é a proteção não só dos pontos de injeção, mas também de toda a área de captação de água (Doerfliger & Zwahlen, 1998).

Como pode ser observada na Figura 8.3, a classe I1 foi classificada em 94% da área total e I2 em 6%. mostra o mapa com o resultado da classificação para este parâmetro.

Partindo da mesma análise a respeito da quantidade de cavidades e dolinas dessa área que fizemos para o Epicarste (item 8.1), a maioria da região (94%) é mais vulnerável, já que consta com mais densidade de feições cársticas, que se apresentam mais susceptíveis através de seus condutos. O restante da área (6%) é considerado de média vulnerabilidade.

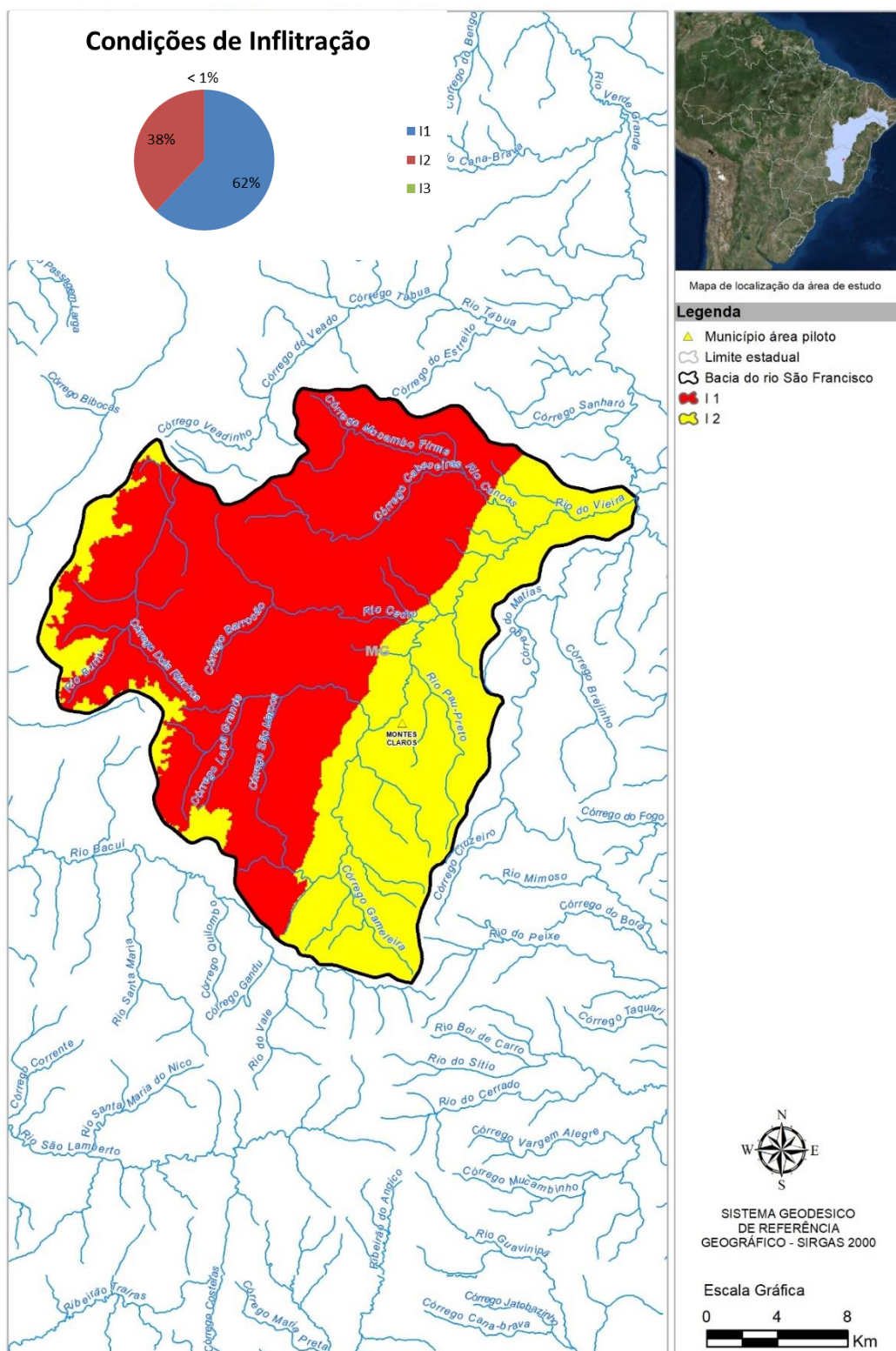


Figura 8.3: Parâmetro I: condições de infiltração.

8.4 Classificação a partir do parâmetro: Grau de desenvolvimento da rede cárstica (K)

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

Como pode ser observada na Figura 8.4, a classe K1 foi classificada em 62% da área total e K2 em 38% e o mapa com o resultado da classificação para este parâmetro.

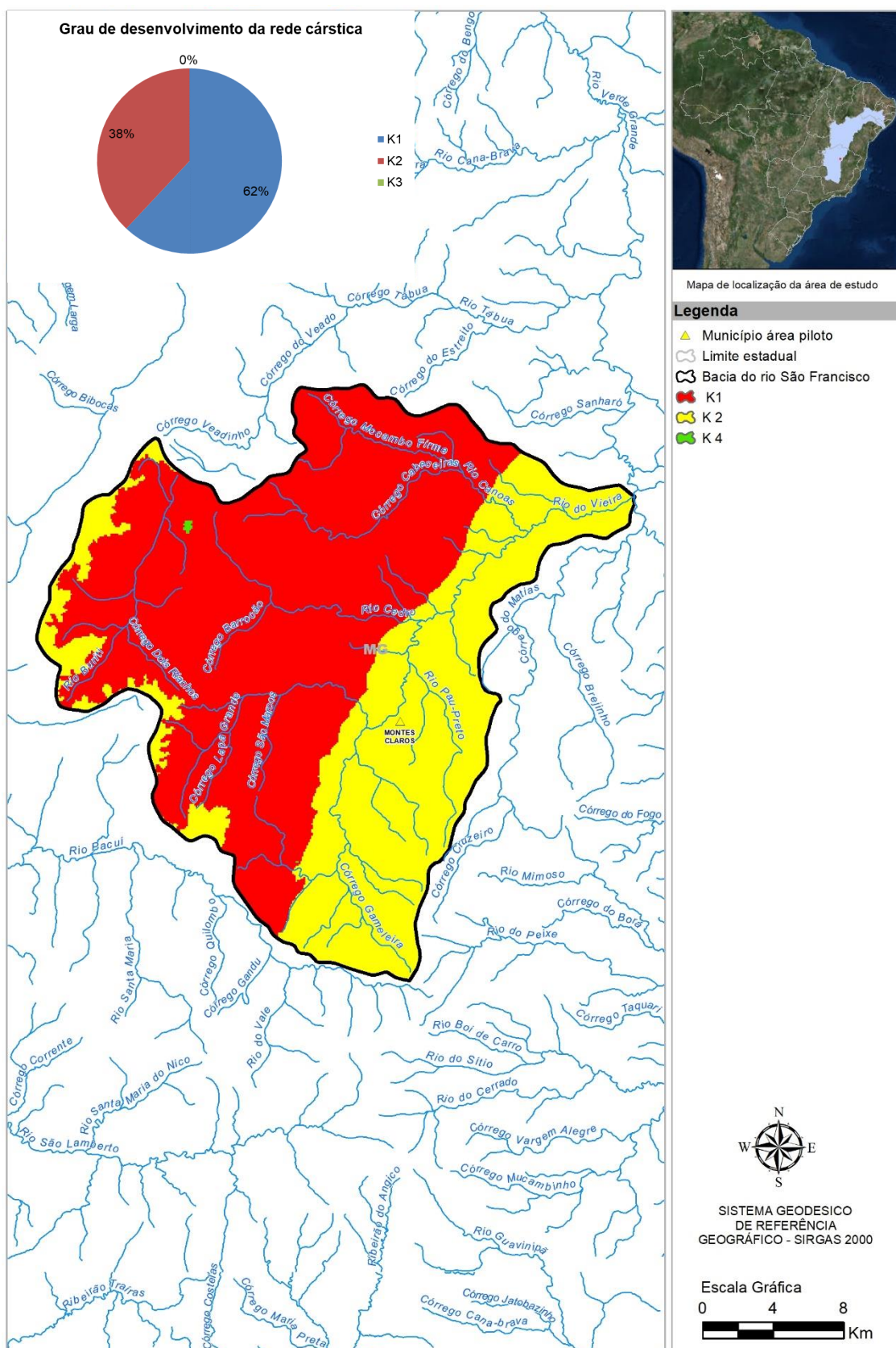


Figura 8.4: Parâmetro K: grau de desenvolvimento da rede cárstica.

8.5 Álgebra de mapas e cruzamento das classificações

Com a área piloto devidamente classificada para cada um dos parâmetros, foi possível realizar o cruzamento dessas informações a fim de gerar o mapa de vulnerabilidade da área adotada.

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

Após a geração do mapa, foi realizada uma reclassificação do mesmo com a finalidade de agrupar os valores obtidos para cada área específica dentro das classes estabelecidas na metodologia aplicada⁶.

Como pode ser observada na Figura 8.5, a classe alta foi classificada em 94% da área total e a média foi classificada em 6%.

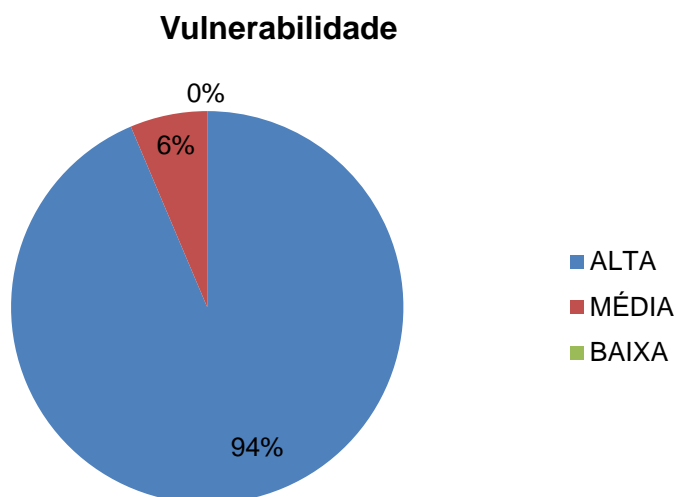


Figura 8.5: Classificação da vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

Segue a Figura 8.6, que mostra então o mapa com o resultado da vulnerabilidade para a área piloto da Bacia do Rio do Vieira.

⁶ A metodologia EPIK, original e adaptado, foi descrita no Volume II, TOMO 2.

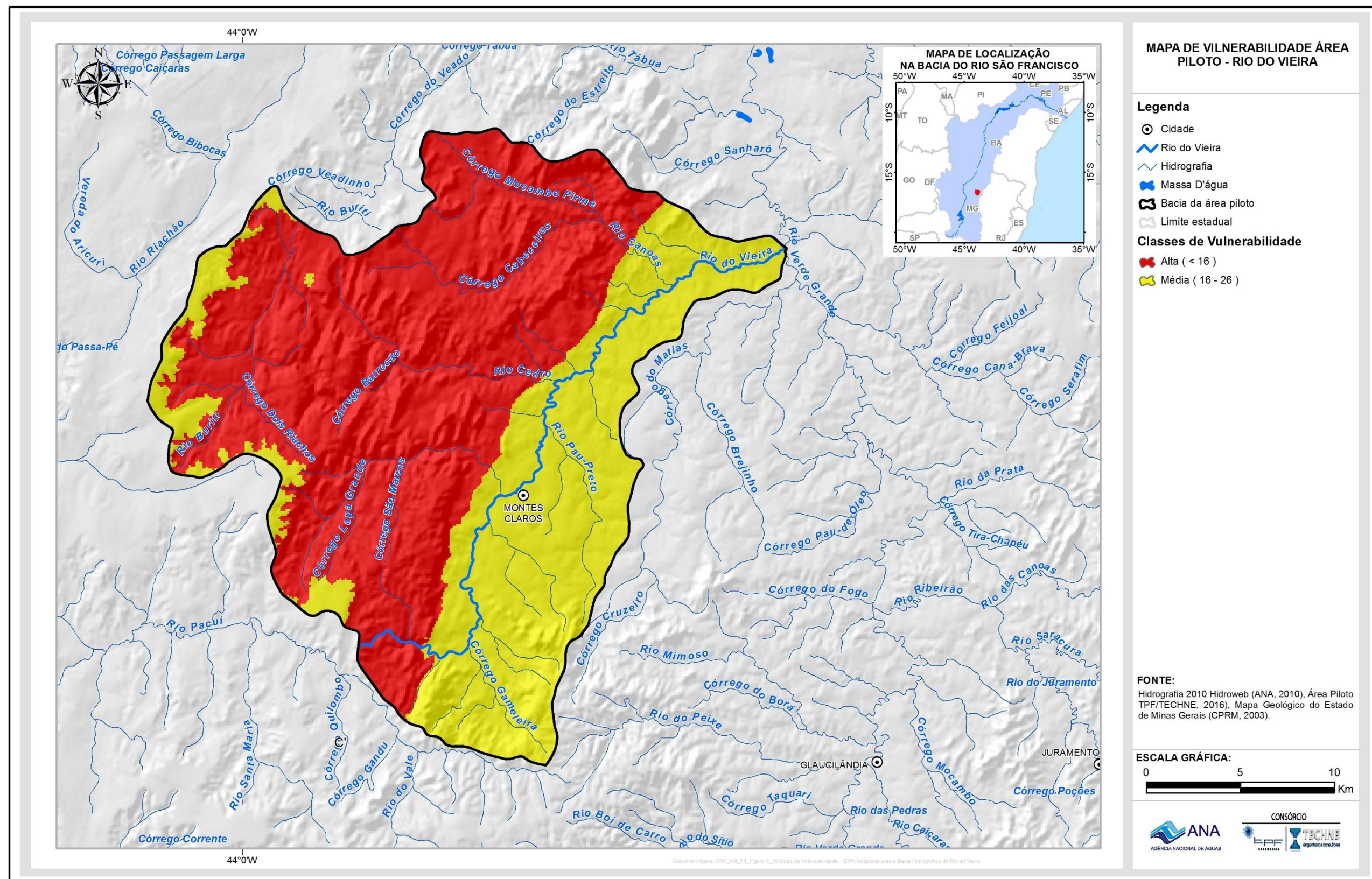


Figura 8.6: Mapa de Vulnerabilidade – EPIK Adaptado para a Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

9. PERIGO DE CONTAMINAÇÃO

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

Além disso, o risco de contaminação pode ser examinado quando se sobrepõem os resultados do cadastro de carga contaminante de subsolo (Figura 9.1) ao mapa de vulnerabilidade (Figura 8.6), ou seja, essa interação entre os dois mapas já citados resulta na Figura 9.2 – Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação.

A vulnerabilidade, é alta na maior parte do município, portanto, toda e qualquer ocorrência de fontes contaminantes de elevada intensidade é considerada de alto perigo de contaminação, ou como Atividades capazes de gerar elevada carga contaminante se desenvolvem ou estão planejadas para se desenvolverem numa área de alta ou extrema vulnerabilidade do aquífero causam grande risco ao aquífero da região.

Tabela 9.1 - Classificação do perigo à contaminação.

Perigo à Contaminação		EPIK adaptado		
		Baixa	Média	Alta
POST	Reduzido	Muito baixo	Baixo	Baixo
	Moderado	Baixo	Moderado	Alto
	Elevado	Moderado	Alto	Extremo

Na Figura 9.1 pode-se observar que as fontes contaminantes estão concentradas na área urbanizada do município em que a bacia está inserida, onde se tem um grande número de postos de combustível e esgotamento sanitário, que são de elevado potencial de contaminação, além de cemitérios, de moderada carga contaminante.

Portanto, a área urbana de Montes Claros é de extremo perigo de contaminação, pois contém fontes de alto potencial contaminante em locais de alta vulnerabilidade (Figura 9.2). Em outros pontos da área piloto onde se tem lixões e lavoura temporária em locais de vulnerabilidade alta também é de extremo perigo de contaminação. E aqueles que contêm cemitérios em pontos de alta vulnerabilidade são considerados de alto perigo de contaminação, conforme a Tabela 9.1.

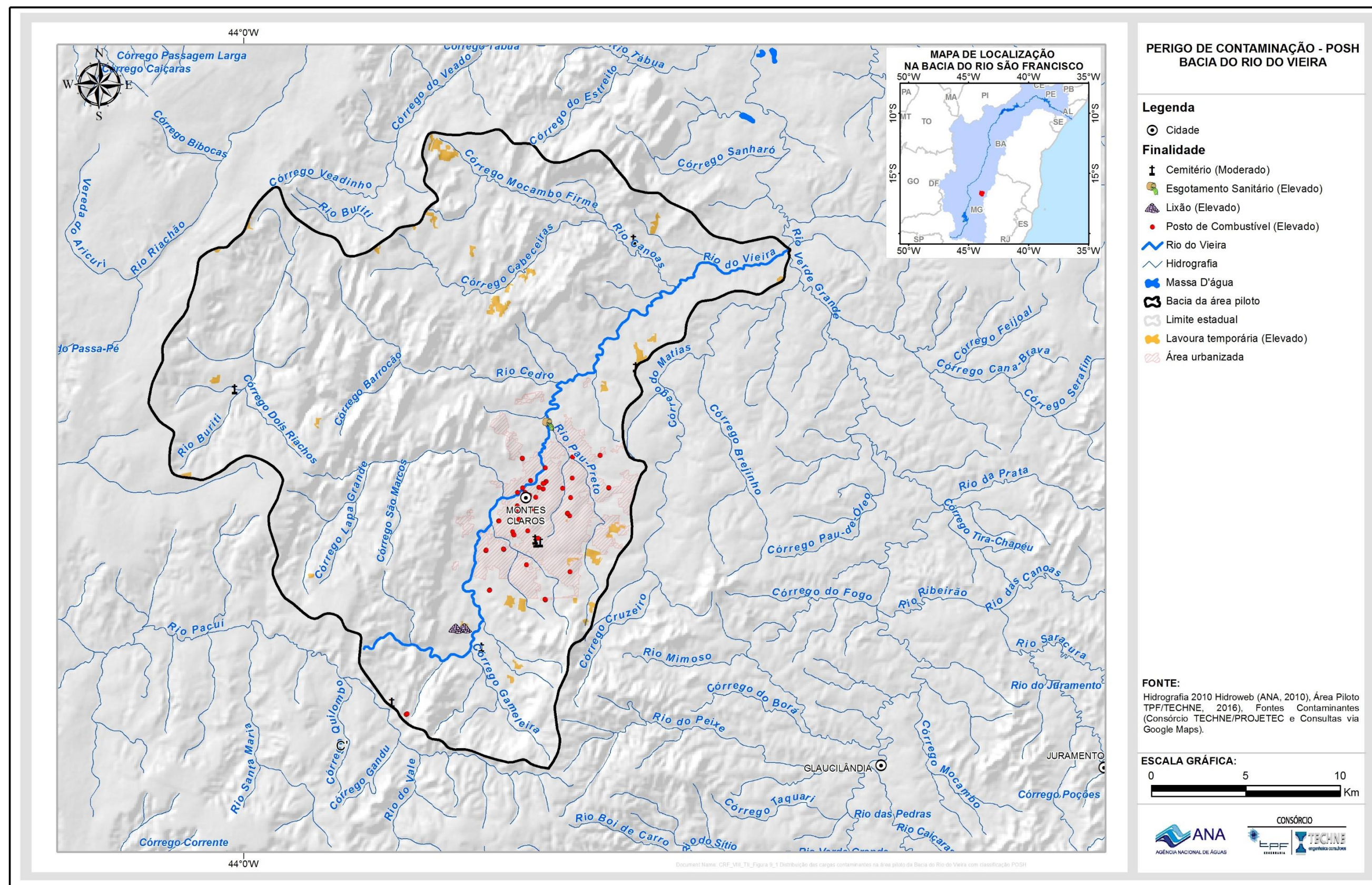


Figura 9.1: Distribuição das cargas contaminantes na área piloto da Bacia do Rio do Vieira com classificação POSH.

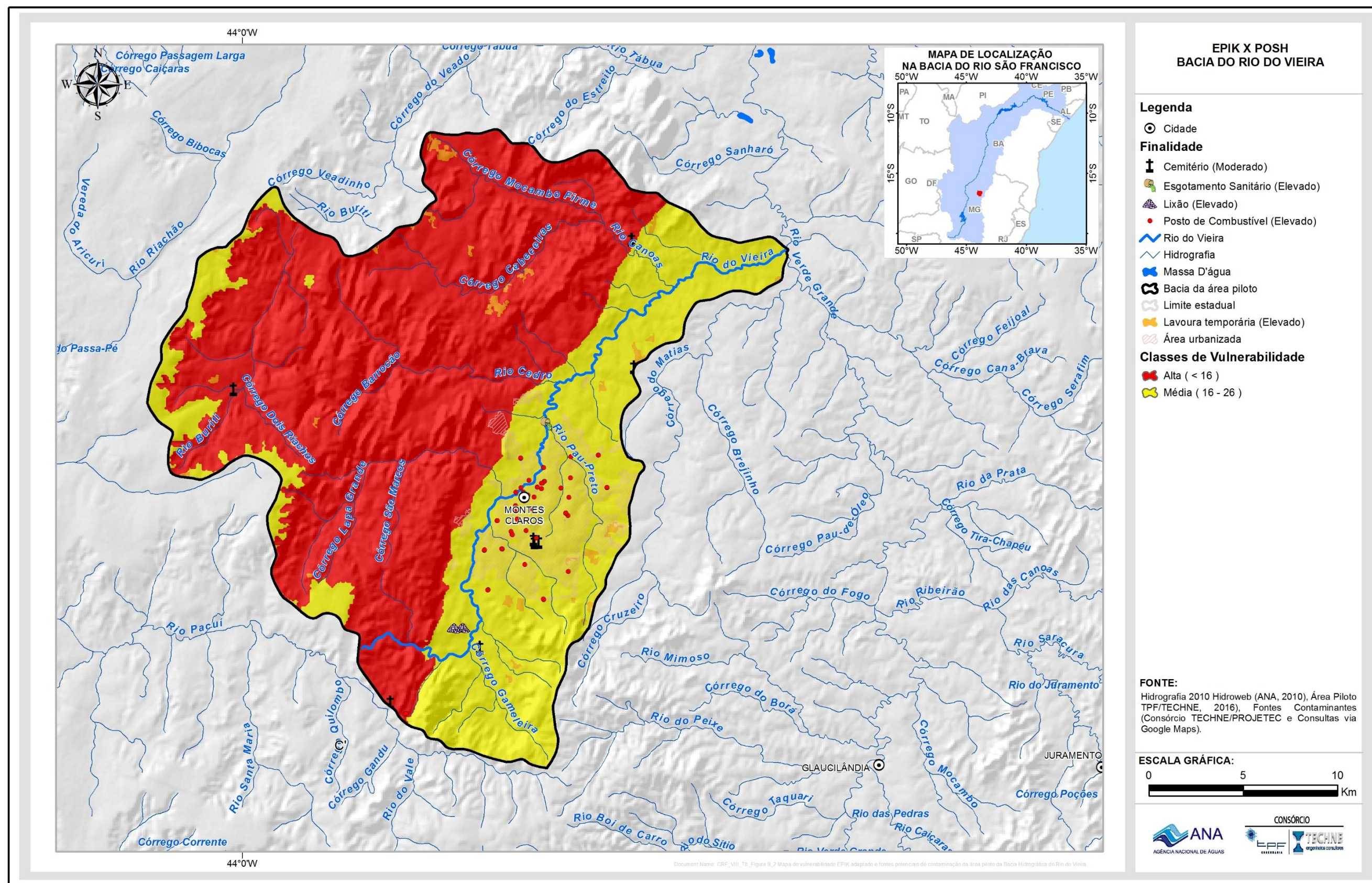


Figura 9.2: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação da área piloto da Bacia Hidrográfica do Rio do Vieira.

11. A QUESTÃO JAÍBA

A cidade de Jaíba ocupa ambas as margens do rio Verde Grande, afluente pela margem direita do São Francisco, no norte de Minas, já perto da fronteira com a Bahia. Afloram em toda a região rochas carbonatadas do subgrupo Paraopeba indiviso, pertencente ao Grupo Bambuí.

No ano de 2013 o rio Verde Grande estava com nível muito baixo, devido ao fraco período chuvoso 2012/2013 (543,3 mm em 2012), como registrado na estação de Juramento (83452 INMET) em Montes Claros. Cinco quilômetros a montante da cidade de Jaíba, as baixas águas deixaram perceber a existência de três sumidouros que absorviam parte do escasso fluxo do rio. Em dezembro deste mesmo ano ocorreu na região a maior pluviometria mensal, considerando um período de 27 anos, submergindo a entrada do grande sumidouro. O período chuvoso seguinte, 2013/2014, foi generoso, mas com as chuvas concentradas apenas nos meses de novembro, dezembro e janeiro, fazendo com que em outubro o sumidouro já estivesse novamente seco.

Esse comportamento do sumidouro sugere que as estruturas cársticas observadas no leito e no flanco do canal do Rio Verde Grande se comportam ora como sumidouros, ora como surgências, na dependência das relações de carga hidráulica entre o rio e o freático regional. Nessa concepção, o Rio Verde Grande teria um comportamento influente, quando em altas águas, e efluente, nas baixas águas. Nessas condições, as perdas de água para os sumidouros, visíveis em determinado momento do ciclo hidrológico, não devem ser consideradas como perdas definitivas, elas constituem, antes, uma contribuição feita pelo rio ao meio cárstico que as deve restituir a médio ou longo prazo, na dependência das variações pluviométricas.

A bacia hidrográfica do rio Verde Grande drena uma área aproximada de 30.420 km², sendo que desse total 87% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante, 13%, ao Estado da Bahia. Estão inseridos nessa região trinta e cinco municípios, sendo vinte e sete mineiros e oito baianos. A demografia da bacia do Verde Grande é fortemente influenciada pela presença da cidade de Montes Claros, principal polo regional. Mais de 1/3 da população da bacia reside, com efeito, em Montes Claros.

A bacia do Verde Grande possui grande variabilidade espacial da chuva. O total anual médio precipitado é da ordem de 785 mm, sendo que os mais altos índices se concentram nas cabeceiras da bacia, atingindo valores anuais superiores a 1.300 mm. Esses índices vão diminuindo gradualmente em direção ao centro da bacia, até atingir valores inferiores a 700 mm.

A distribuição da chuva na bacia ao longo do ano revela a existência nítida das estações seca e úmida. A análise da ocorrência de chuvas em anos diferentes mostra que em cerca de 20% dos anos, identificados como os mais secos, a chuva na Bacia é inferior a 70% da chuva anual média, enquanto que no outro extremo, 20% dos anos, identificados como os mais úmidos, a chuva é superior a 130% da chuva anual média. Este fato comprova a elevada variabilidade do regime de chuvas, o que se reflete no potencial hídrico dos mananciais da bacia, superficiais e subterrâneos.

Do ponto de vista geológico, o rio Verde Grande corre sobre rochas carbonatadas do Subgrupo Paraopeba Indiviso (CPRM/COMIG, 2003). O vale do rio Verde Grande é esculpido no denominado Grupo Bambuí Indeformado (Subdomínio IIId), caracterizado litologicamente por calcários expostos, apresentando muitas feições cársticas em superfície.

Para avaliar tal comportamento e mapear as zonas mais intensamente carstificadas foram realizadas campanhas de eletrorresistividade em uma área retangular de 2000 km² incluindo parte dos municípios de Matias Cardoso, Verdelândia e Varzelândia, a sede municipal de Jaíba e as grandes áreas de irrigação do chamado Projeto Jaíba⁷.

11.1 Estudo geofísico por eletrorresistividade

11.1.1 O Índice de Carstificação

A heterogeneidade física do calcário, condicionada por uma intensiva e extensiva ocorrência de espaços vazios, sejam eles secos ou saturados, acarreta, evidentemente, uma pronunciada heterogeneidade elétrica do meio. Essa heterogeneidade elétrica, flagrada nos perfis de resistividade, permite distinguir os calcários carstificados daqueles que não o são. De acordo com Feitosa (2004), o chamado índice de carstificação clássico procura quantificar a heterogeneidade elétrica, sendo definido de acordo com a expressão abaixo, válida para perfis lineares:

$$IC_i = \left[\left(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j| \right) \cdot \rho_i \right] / 2$$

Na definição acima, o IC ($\Omega^2.m^2$) utiliza, como peso, a resistividade aparente da estação considerada. A utilidade dessa ponderação reside em amplificar o valor do índice nas zonas resistivas e atenuá-lo nas zonas condutivas. É uma forma de minimizar eventuais variabilidades elétricas significativas em zonas de predominância de pelitos, por exemplo.

O significado dos diferentes elementos, na expressão acima, pode ser entendido examinando-se a Figura 11.1, onde cabem os seguintes comentários:

- As resistividades aparentes são medidas durante a realização do perfil, em pontos espaçados de Δx metros.
- Em um determinado ponto i tem-se a resistividade aparente ρ_i . No ponto imediatamente anterior, Δx metros antes, tem-se o ponto $j = 1$ ou, se quiser, o ponto 1, onde foi medida a resistividade aparente $\rho_j = \rho_1$. No ponto imediatamente posterior, Δx metros depois, tem-se o ponto $j = 2$ ou, se quiser, o ponto 2, onde foi medida a resistividade aparente $\rho_j = \rho_2$.

⁷ Grande perímetro de fruticultura irrigada com cerca de 65.000 ha na região denominada Mata da Jaíba, fruto de parceria entre o governo federal e o governo de Minas, cujas origens remontam à década de 1950.

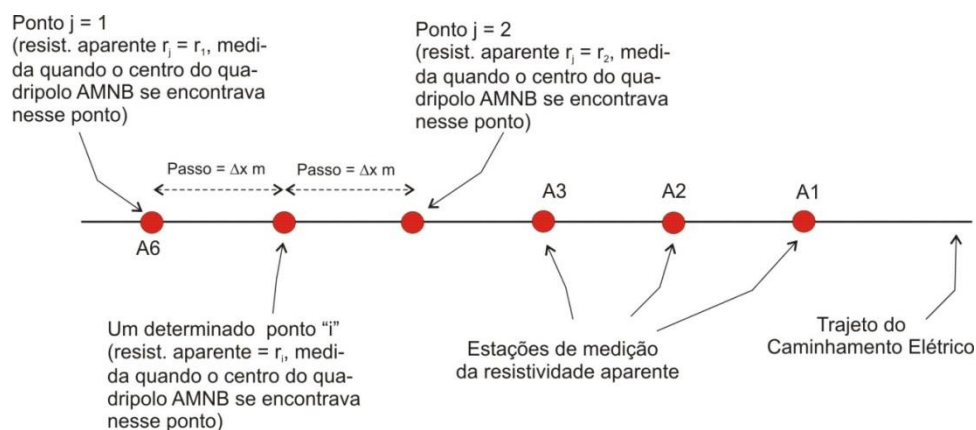


Figura 11.1: Cálculo do Índice de Carstificação

Para a aplicação da expressão do IC, acima mostrada, faz-se o seguinte:

- Fixa-se inicialmente um ponto “i” que é sempre o segundo ponto de uma relação de pontos.
- Faz-se uma varredura de todos os outros pontos e selecionam-se aqueles que estão situados num raio menor que $(\Delta x + \varepsilon)$ metros em torno do ponto “i”. Isso é feito rapidamente, pois que todos os pontos, isto é, todas as estações de medição, têm coordenadas. No presente caso são selecionados dois pontos (o de ré e o de vante), uma vez que se trabalhou com perfis retilíneos.
- Faz-se agora a seguinte soma: $|p_i - p_1| + |p_i - p_2|$. Usam-se os valores absolutos das diferenças, para evitar números negativos que desvirtuariam os objetivos do cálculo.
- O somatório acima é dividido pelo número de parcelas, que são duas no caso em foco, para se obter uma variabilidade elétrica média. Essa variabilidade é multiplicada pela resistividade aparente do ponto “i” para se obter o índice de carstificação deste ponto.
- Após as operações acima descritas, tem-se o valor do IC no ponto “i”. Passa-se então para o ponto seguinte, isto é, um novo ponto “i”, e se repete todo o procedimento. Ao final tem-se o IC de todas as estações de medição, em todos os caminhamentos elétricos realizados.

Faz-se, finalmente, o zoneamento do IC para se visualizar as áreas de maior variabilidade elétrica, isto é, as áreas onde são esperadas as maiores intensidades de carstificação.

Na dependência do comportamento geológico e hidroquímico da área investigada, algumas variantes do índice de carstificação podem ser aplicadas. Essas variantes são as seguintes:

- Índice de carstificação simples ($\Omega.m$). Esta variante prescinde de ponderações. Ela mede simplesmente a variabilidade elétrica de uma estação de medição em relação às estações de ré e de vante, ao longo de um perfil. Ela pode ser utilizada em áreas de calcário puro, onde a variabilidade elétrica traduza heterogeneidades unicamente nesse tipo de rocha. A expressão utilizada, válida para perfis lineares, é a seguinte: $IC_i = [(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j|)]/2$

- Índice de carstificação percentual (%). Nesta variante a variabilidade elétrica é expressa como um percentual da resistividade aparente da estação considerada. Essa forma é útil quando se tem variações da qualidade química da água nos calcários. Nos carstes com água salinizada, com efeito, a intensa condutibilidade eletrolítica tende a uniformizar os valores da resistividade aparente (Porto Lira, 2001), minimizando ou, em casos mais extremos, eliminando quase que completamente a variabilidade elétrica denunciadora da heterogeneidade física do meio. Com a utilização do IC percentual, portanto, as pequenas variabilidades em um calcário eletricamente condutivo são amplificadas, podendo assumir valores numéricos da mesma ordem de grandeza que as grandes variabilidades que ocorrem nos calcários eletricamente resistivos. A expressão utilizada, válida para perfis lineares, é a seguinte: $IC_i = \{[(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j|)/2]/\rho_i\} \cdot 100$
- Índice de carstificação polinomial. Nesta variante, são ajustados polinômios de grau n aos perfis de IC elaborados. Os polinômios suavizam os perfis, eliminando variações abruptas localizadas, e mostram as variações mais significativas, regionalmente, do IC. Esta variante do índice de carstificação pode ser chamada de IC polinomial. Os polinômios podem ser ajustados aos perfis de qualquer uma das variantes acima definidas, pelo que a unidade do IC polinomial pode ser $\Omega^2.m^2$, $\Omega.m$ ou %.

11.1.2 Serviços realizados

Foi realizada uma campanha de eletrorresistividade em outubro/novembro de 2014 em uma área retangular de 2.000 km² cujo limite norte situa-se 30 km a norte de Jaíba. O objetivo da eletrorresistividade foi discernir e mapear zonas mais intensamente carstificadas. Esta campanha constou de 141 km de perfis laterais de resistividade (caminhamentos elétricos) com linha AB de emissão de corrente igual a 200 metros, linha MN de recepção igual a 20 metros e passo de 200 metros (Figura 11.2).

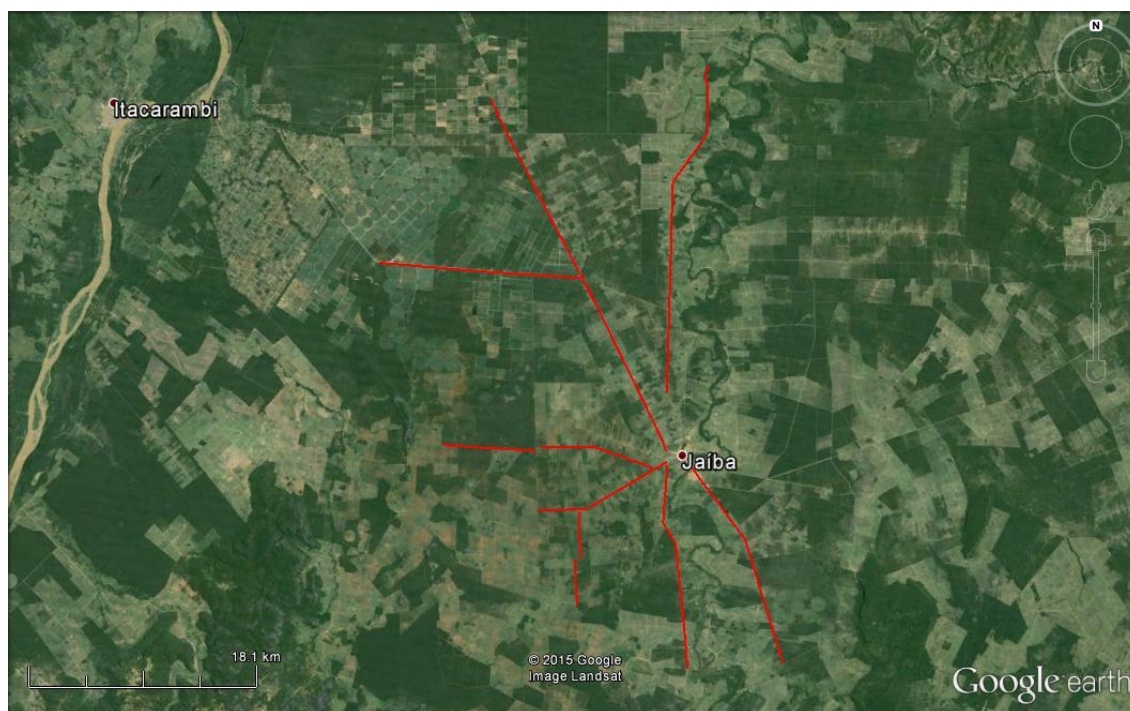


Figura 11.2: Caminhamentos elétricos realizados em Jaíba.

11.1.3 Resultados obtidos

Os resultados obtidos são mostrados sob a forma de dois mapas:

- Mapa de resistividades aparentes em AB=200 m
- Mapa do índice de carstificação simples (AB=200 m)

Mapa de resistividades aparentes em AB=200 m

Este mapa⁸ é mostrado na Figura 11.3. Sabe-se, de experiências anteriores, que calcários ricos em carbonato de cálcio são mais propensos à dissolução e pouco se alteram, de modo que deixam poucos resíduos formadores de solo. Esses são os calcários onde se desenvolvem preferencialmente as feições cársticas, sendo, assim, os calcários aquíferos por excelência. Eles são também eletricamente mais resistivos, o que lhes é uma característica distintiva. Os valores anormalmente altos de resistividade, entretanto, que ocorrem eventualmente nesses calcários, não refletem necessariamente a resistividade real do meio, mas traduzem, antes, distorções localizadas do campo elétrico, associadas à variabilidade física da rocha.

Considerando o acima exposto, verifica-se que nas grandes áreas mostradas na cor branca, no mapa da Figura 11.3 (resistividades aparentes menores que 1.100 ohm.m) devem ser menores as probabilidades de ocorrência de estruturas cársticas significativas.

Por outro lado, ocorrem zonas mais resistivas, mostradas numa graduação do amarelo para a cor rosa, onde podem ser esperadas carstificações mais frequentes. Essas zonas mais resistivas ocorrem isoladamente. Suas disposições, entretanto, parecem sugerir direções preferenciais de carstificações orientadas E-W e N-S.

Nas manchas isoladas a resistividade aparente pode atingir valores de 9.100 ohm.m e mesmo valores maiores. Três dessas zonas são assinaladas.

- Zona 1 – Situada 5,0 km ao sul de Jaíba (Situam-se aqui os conhecidos sumidouros do rio Verde Grande, acima discutidos).
- Zona 2 – Situada 3,0 km ao sul da Zona 1
- Zona 3 – Situada 5,5 km a norte de Jaíba

⁸ Foi utilizado o interpolador Kriging

Mapa do índice de carstificação simples

O mapa do índice de carstificação, mostrado na Figura 11.4, confirma e restringe a área de ocorrência provável de carstificações significativas.

A inspeção desse mapa mostra que, na área coberta pelas medições, despontam 2 manchas isoladas, delimitadas pela isolinha de 2100 ohm.m, consideradas como de alta variabilidade elétrica e, conseqüentemente, de alta heterogeneidade física. No restante da área estudada prevalecem baixos valores do IC sugerindo a predominância de calcários mais uniformes, sem carstificações significativas.

Primeira mancha de alto IC

O início da primeira mancha de alto IC situa-se cerca de 3,0 km ao sul da zona urbana de Jaíba. Esta mancha mede cerca de 7,0 km E-W por cerca de 5,0 km N-S e exibe dois núcleos de maior variabilidade elétrica. O núcleo situado na porção norte da mancha inclui o famoso sumidouro do Rio Verde Grande, como que a ratificar o diagnóstico da eletrorresistividade. No núcleo situado na porção sul da mancha a variabilidade parece ser mais intensa. Não se conhecem até o momento, entretanto, exocarstes que lhe sejam associados. Chama-se a atenção para o fato de que um grande trecho meandrante do rio Verde Grande, com extensão de 20,0 km, situa-se nessa primeira mancha aqui discutida (ver Figura 11.4). Esse trecho do rio deve ser alvo de investigações detalhadas em futuros estudos dos carstes de Jaíba.

Esta estrutura está associada ao Córrego Escuro e apresentam poços com vazões que podem alcançar 300,00 m³/h. Como se pode ver na Figura 11.4, o Córrego Escuro tem cerca de 8,0 km do seu baixo curso inserido na primeira mancha de alto IC em discussão.

Segunda mancha de alto IC

Outra mancha de alta variabilidade elétrica se delineia 9,0 km a norte da zona urbana de Jaíba, tendo sido interceptada entre as estações 15 e 22 do perfil 9. Esta mancha é de porte mais discreto que a anterior e não se têm informações sobre a ocorrência, nela, de exocarstes.

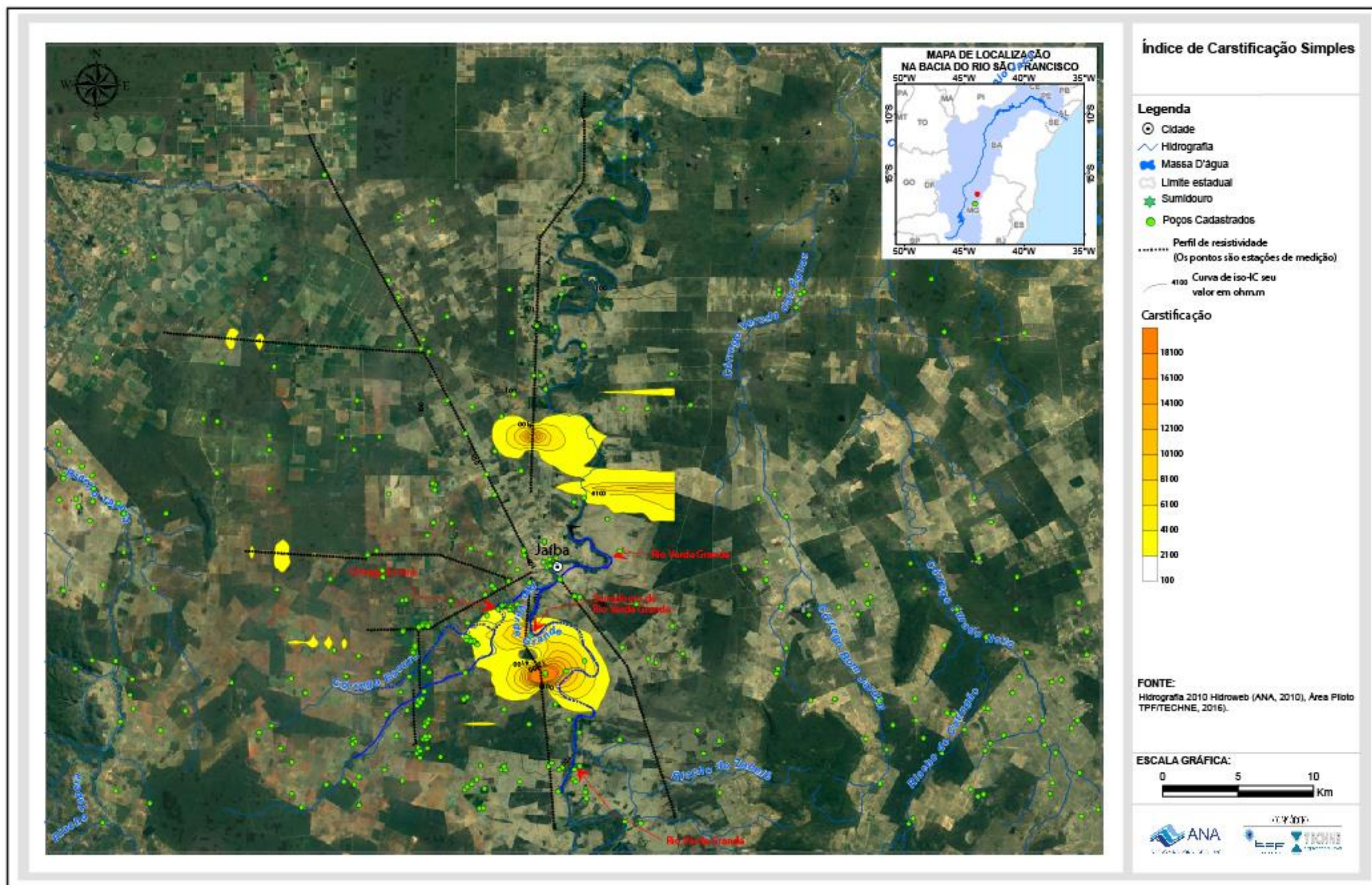


Figura 11.4: Mapa do índice de carstificação.

Zoneamento de Vazões em Jaíba

A distribuição de vazões e suas relações com as áreas de alto índice de carstificação são apresentados na Figura 11.5. Foram consultados 87 poços com dados de vazão.

A Figura apresenta dois alinhamentos de melhores vazões na direção NE-SW. Observa-se que se alinham segundo essa direção o riacho denominado de Córrego Escuro, particularmente em seu baixo curso, bem como o trecho urbano do rio Verde Grande. A chamada primeira mancha de alto IC, acima descrita, onde se situa o famoso sumidouro do rio Verde Grande, aproxima-se, pelo Sul, do alinhamento de vazões mais conspícuo. A segunda mancha de alto IC, por sua vez, aproxima-se, também pelo Sul, do alinhamento de vazões mais discreto, observado na Figura 11.5.

A distribuição de poços com vazão informada não privilegiou a região do sumidouro, como se vê na figura 11.5. Dessa forma, não fica tão evidente uma coincidência de boas vazões com zonas de alto IC. Entretanto, a feição da curva de iso-vazão de 10,00 m³/h, fechando praticamente no limite da primeira mancha de alto IC, sugere vazões elevadas.

Na zona da segunda mancha de alto IC, por outro lado, as vazões dos poços são inferiores a 8,00 m³/h. Essa mancha, aparentemente, constitui uma anomalia muito pontual e localizada, detectada entre as estações 15 e 22 do perfil 9.

Os calcários da área aparentam ser, com efeito, muito homogêneos na maior parte da área coberta pelas medições. As anomalias do IC, sugestivas de carstificação intensa, são localizadas, mas podem ter dimensões significativas como, por exemplo, a primeira mancha de alto IC, que contém o sumidouro do rio Verde.

Considera-se importante, em face dos resultados obtidos na área de Lapão, que uma eventual continuação dos estudos na área de Jaíba inclua uma varredura mais densa por eletrorresistividade, nos moldes da varredura de que trataram as linhas acima.

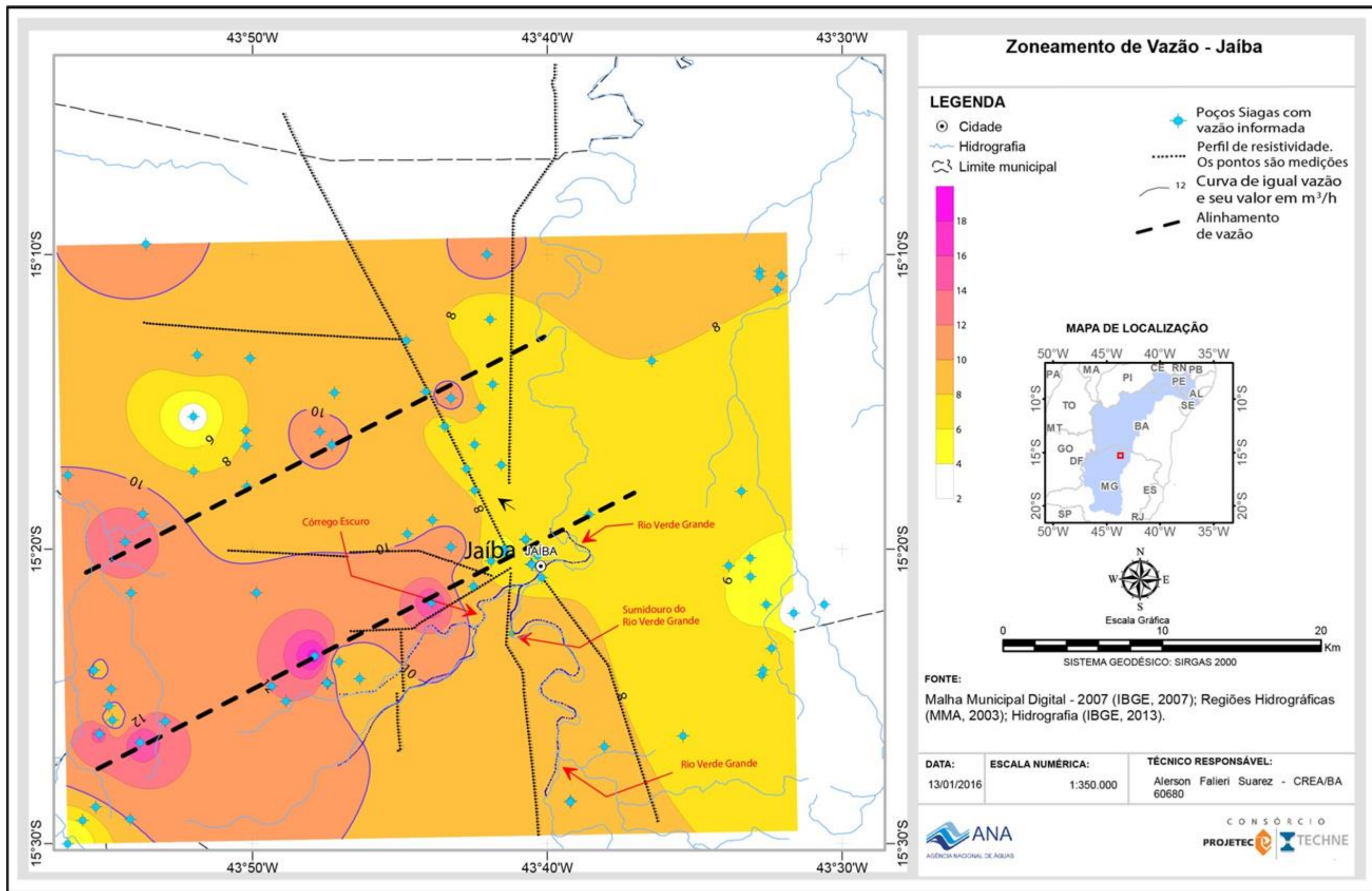


Figura 11.5: Zoneamento de vazões em Jaíba

11.2 Estudo geofísico por gravimetria

O estudo gravimétrico de Jaíba constou da realização de 40 estações gravimétricas distribuídas regularmente na área. A obtenção das medidas de campo, nessas estações gravimétricas, foi realizada no segundo semestre de 2014.

Na Tabela 11.1 são mostradas as coordenadas das estações gravimétricas. A posição dessas estações é mostrada na Figura 11.6, adiante.

Os resultados obtidos são consubstanciados nos seguintes documentos:

- Mapa de anomalia Bouguer completa – Figura 11.7;
- Mapa de anomalia Bouguer regional – Figura 11.8;
- Mapa de anomalia Bouguer residual - Figura 11.9;
- Mapa de derivadas nas direções E-W, N-S e vertical – Figura 11.10 (A, B e C);
- Modelagens 2D e 3D – Figura 11.11.

Tabela 11.1 - Coordenadas das estações gravimétricas

ESTAÇÃO	ZONA	LONG. UTM	LAT. UTM
JA1	23 L	619320.00 m E	8334110.00 m S
JA2	23 L	629198.00 m E	8334388.00 m S
JA3	23 L	636374.00 m E	8334864.00 m S
JA4	23 L	647989.00 m E	8335260.00 m S
JA5	23 L	657028.00 m E	8334377.00 m S
JA6	23 L	619875.00 m E	8327190.00 m S
JA7	23 L	628760.00 m E	8328133.00 m S
JA8	23 L	637683.00 m E	8328890.00 m S
JA9	23 L	648772.00 m E	8328089.00 m S
JA10	23 L	656074.00 m E	8328797.00 m S
JA11	23 L	619957.00 m E	8321290.00 m S
JA12	23 L	629492.00 m E	8322846.00 m S
JA13	23 L	638388.00 m E	8322495.00 m S
JA14	23 L	647061.00 m E	8323211.00 m S
JA15	23 L	656832.00 m E	8323490.00 m S
JA16	23 L	620524.00 m E	8315287.00 m S
JA17	23 L	628543.00 m E	8316279.00 m S
JA18	23 L	637716.00 m E	8316285.00 m S
JA19	23 L	647599.00 m E	8316382.00 m S
JA20	23 L	657341.00 m E	8316485.00 m S
JA21	23 L	620514.00 m E	8308019.00 m S
JA22	23 L	628463.00 m E	8309597.00 m S
JA23	23 L	637449.00 m E	8311003.00 m S
JA24	23 L	646092.00 m E	8310627.00 m S
JA25	23 L	655940.00 m E	8312030.00 m S
JA26	23 L	620193.00 m E	8301663.00 m S
JA27	23 L	627969.00 m E	8302234.00 m S
JA28	23 L	636929.00 m E	8303672.00 m S
JA29	23 L	646126.00 m E	8303176.00 m S
JA30	23 L	655423.00 m E	8303888.00 m S
JA31	23 L	620607.00 m E	8295795.00 m S
JA32	23 L	628148.00 m E	8295468.00 m S
JA33	23 L	636803.00 m E	8296272.00 m S
JA34	23 L	647033.00 m E	8296795.00 m S
JA35	23 L	655614.00 m E	8296971.00 m S
JA36	23 L	619704.00 m E	8289265.00 m S
JA37	23 L	628129.00 m E	8289104.00 m S
JA38	23 L	637549.00 m E	8289221.00 m S
JA39	23 L	647256.00 m E	8288575.00 m S
JA40	23 L	655320.00 m E	8288191.00 m S

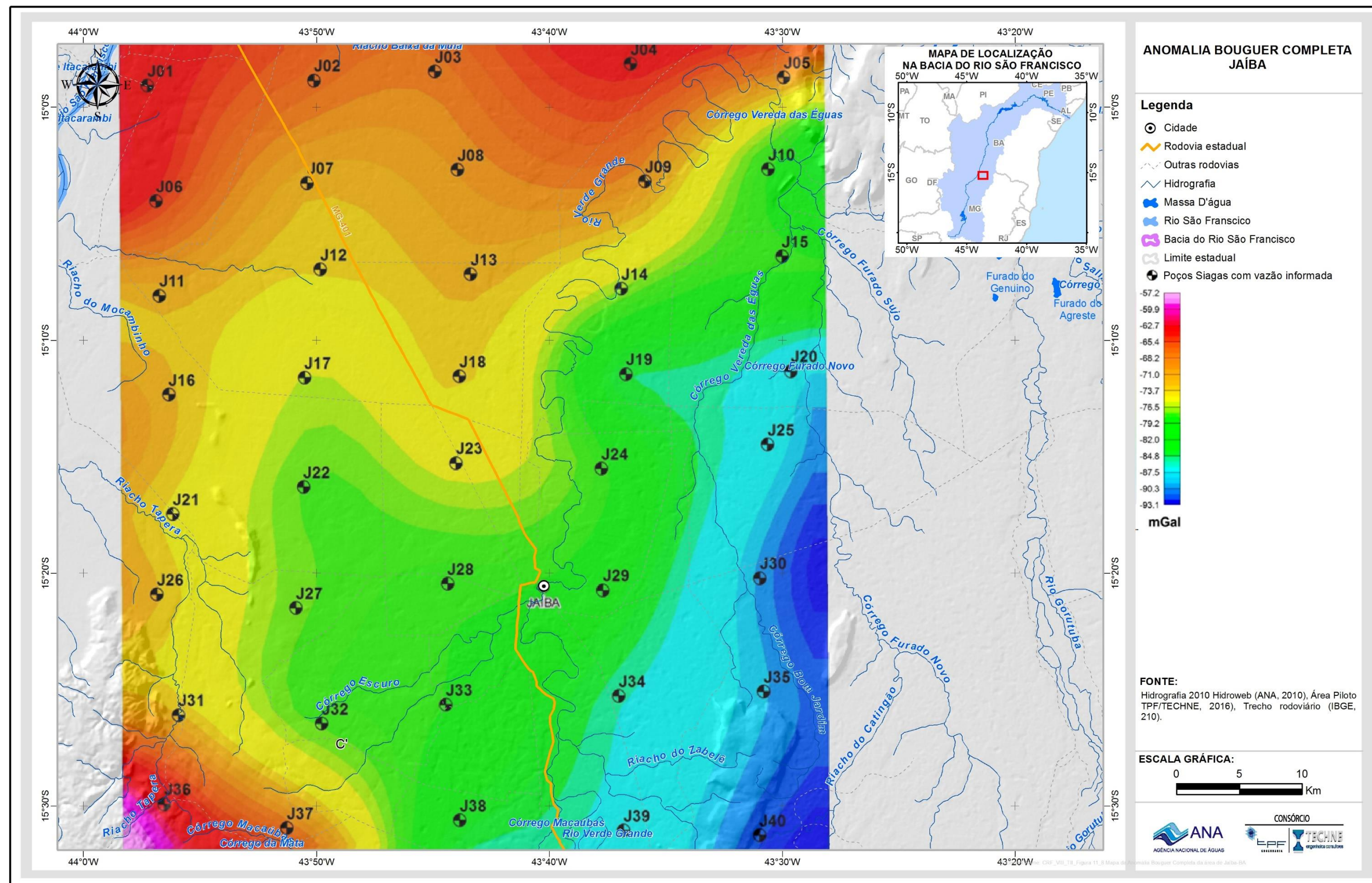


Figura 11.7: Mapa da Anomalia Bouguer Completa da área de Jaíba/BA.

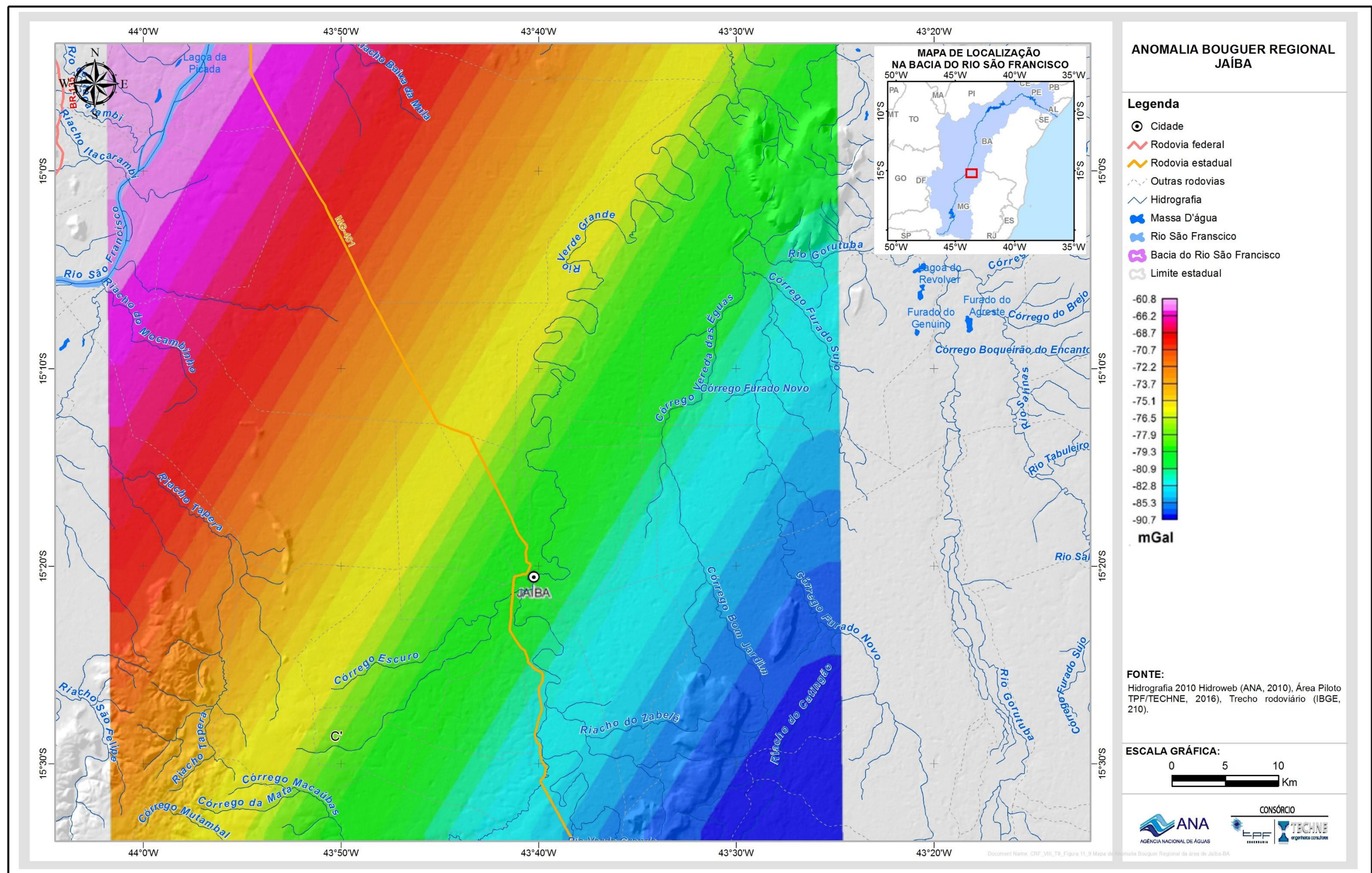


Figura 11.8: Mapa de Anomalia Bouguer Regional da área de Jaíba/BA.

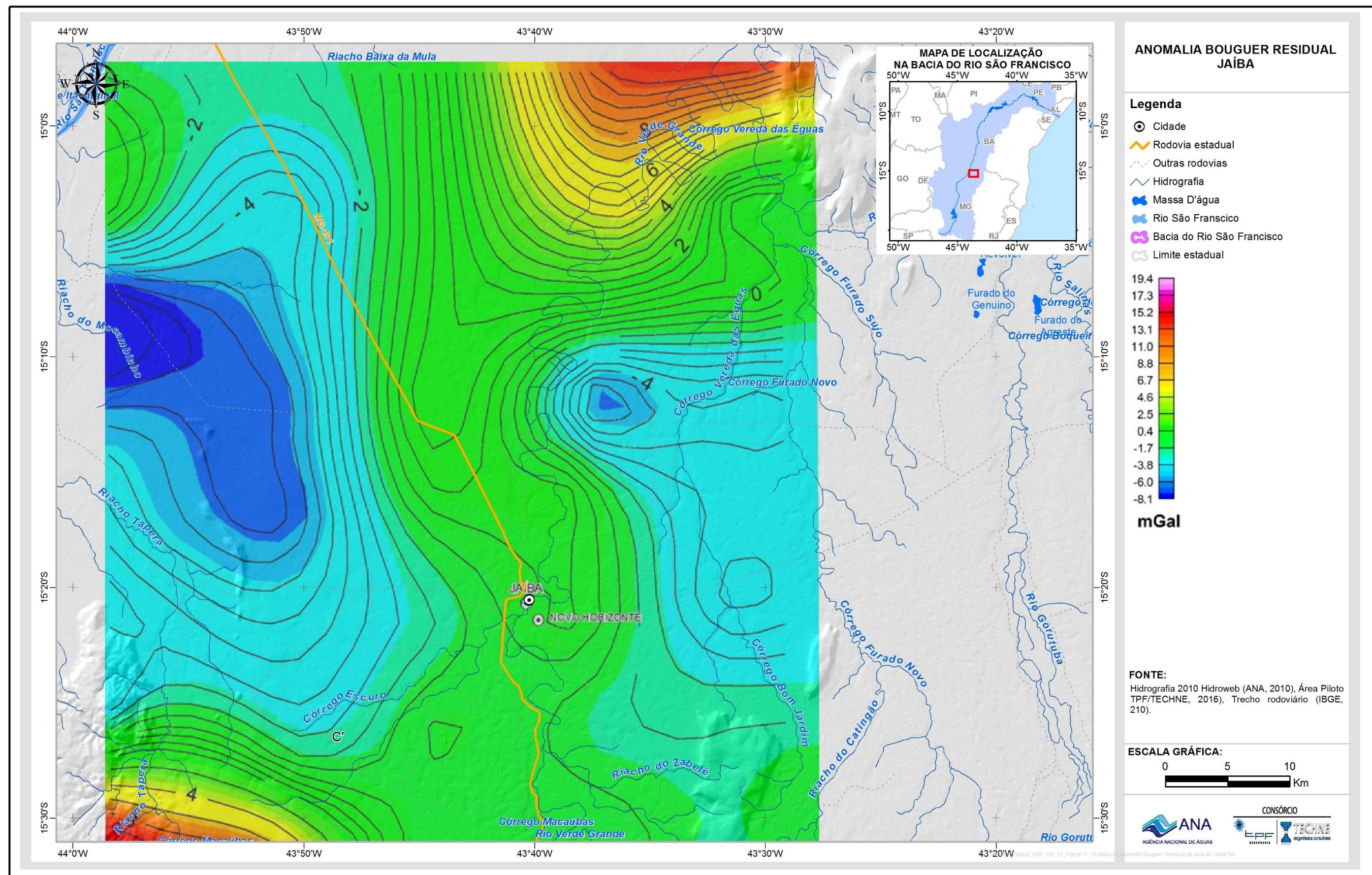


Figura 11.9: Mapa de Anomalia Bouguer Residual da área de Jaíba/BA.

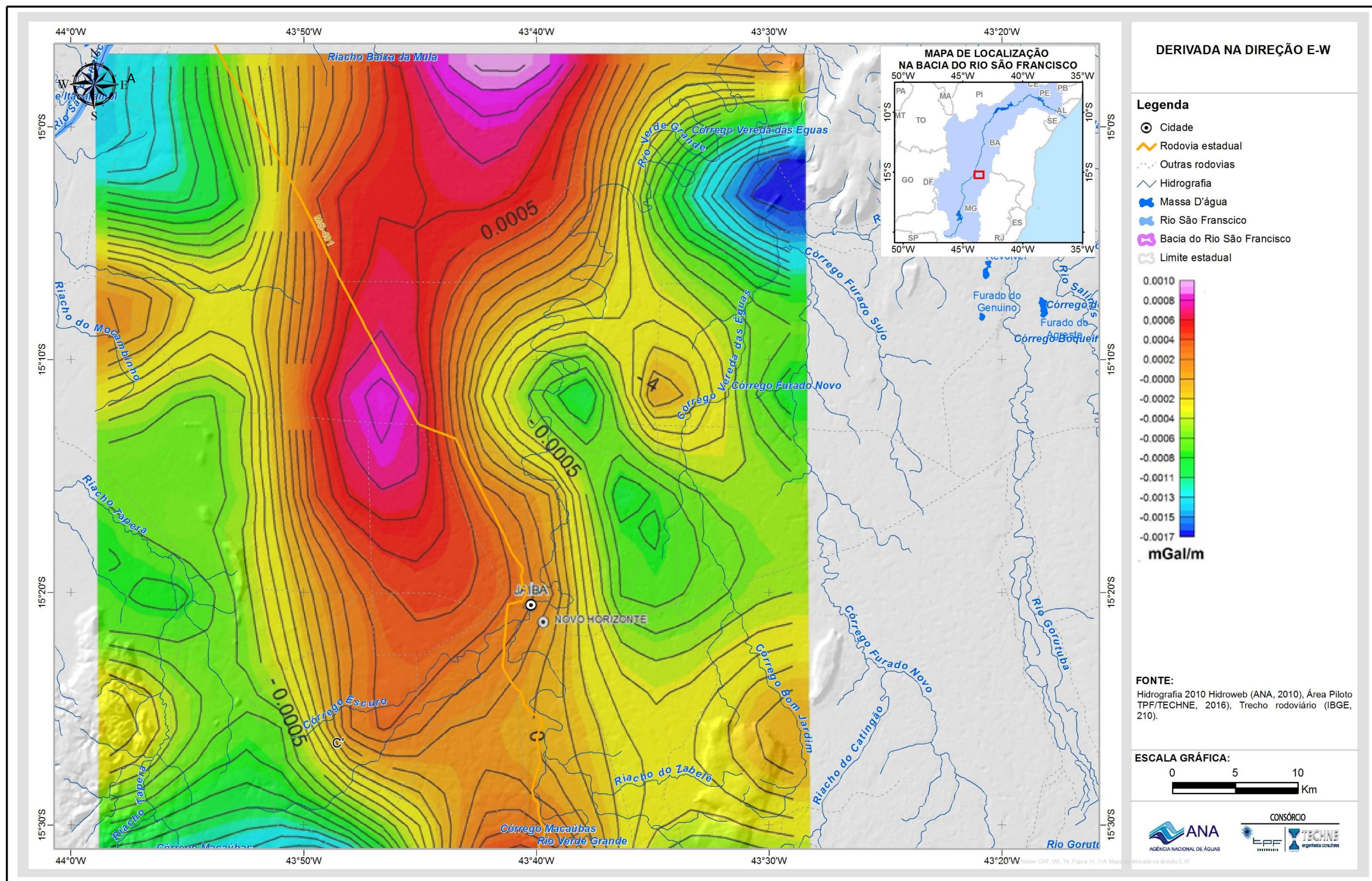


Figura 11.10A: Mapa de derivada na direção E-W.

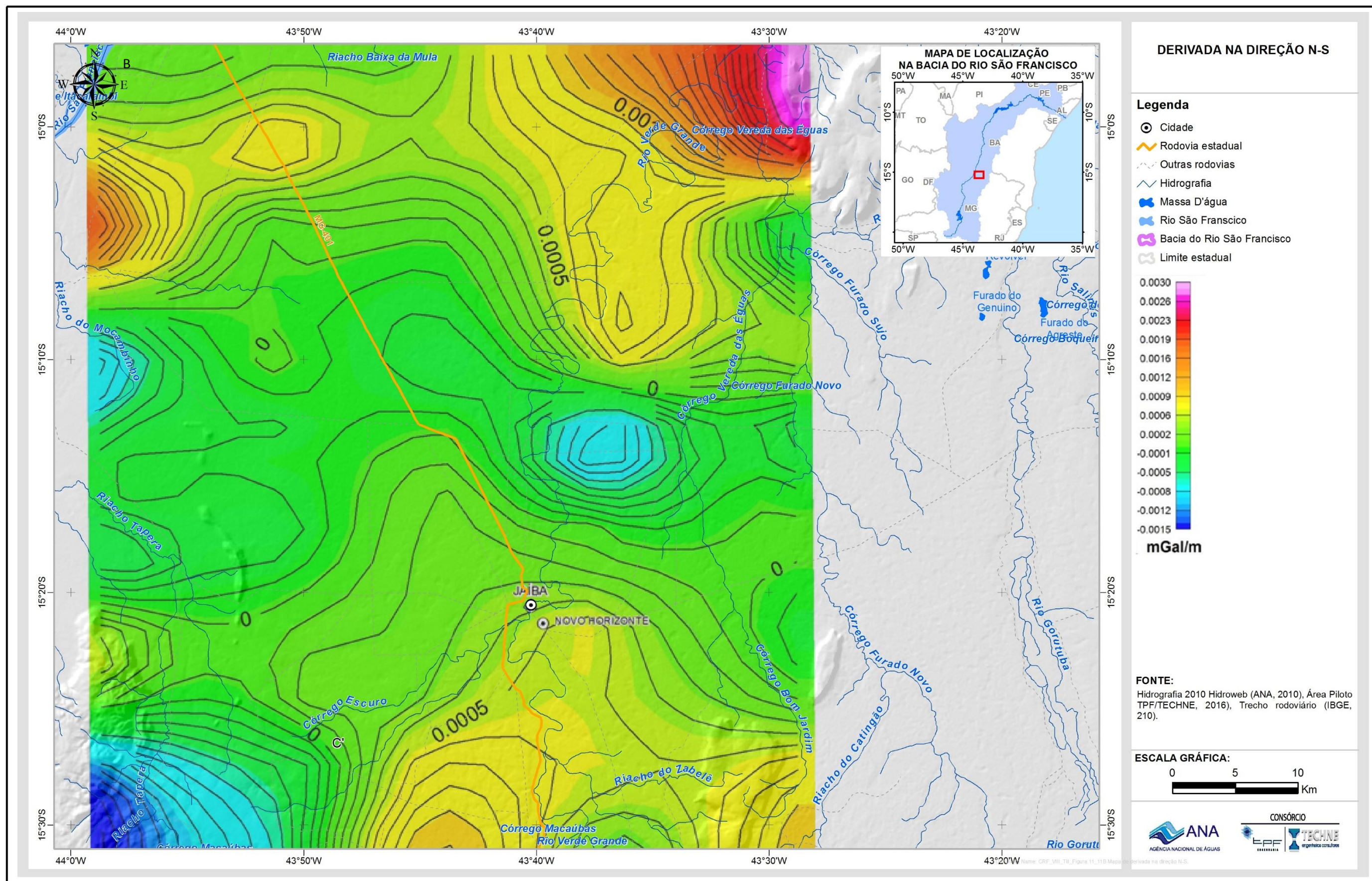


Figura 11.10B: Mapa de derivada na direção N-S.

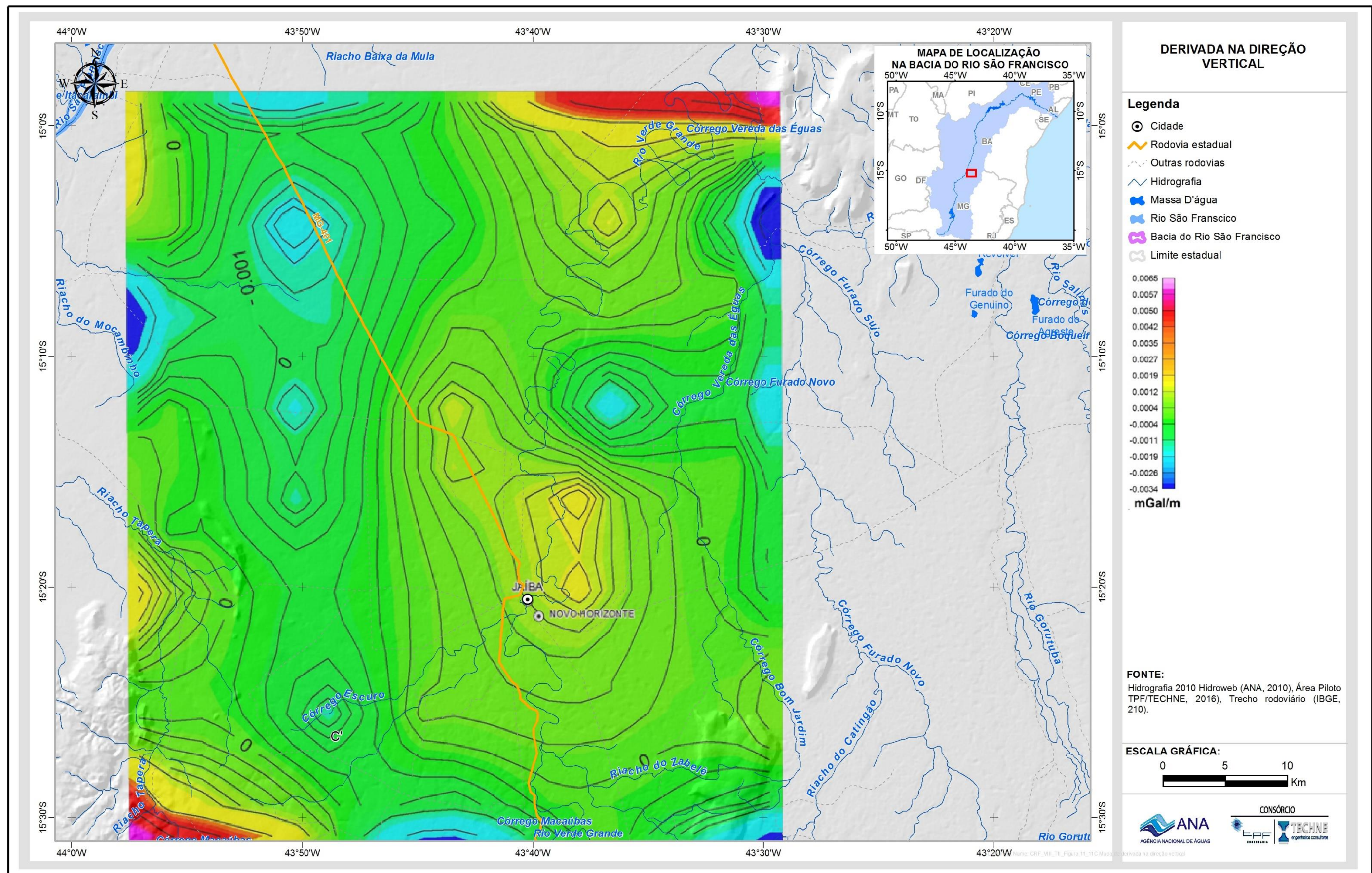


Figura 11.10C: Mapa de derivada na direção vertical.

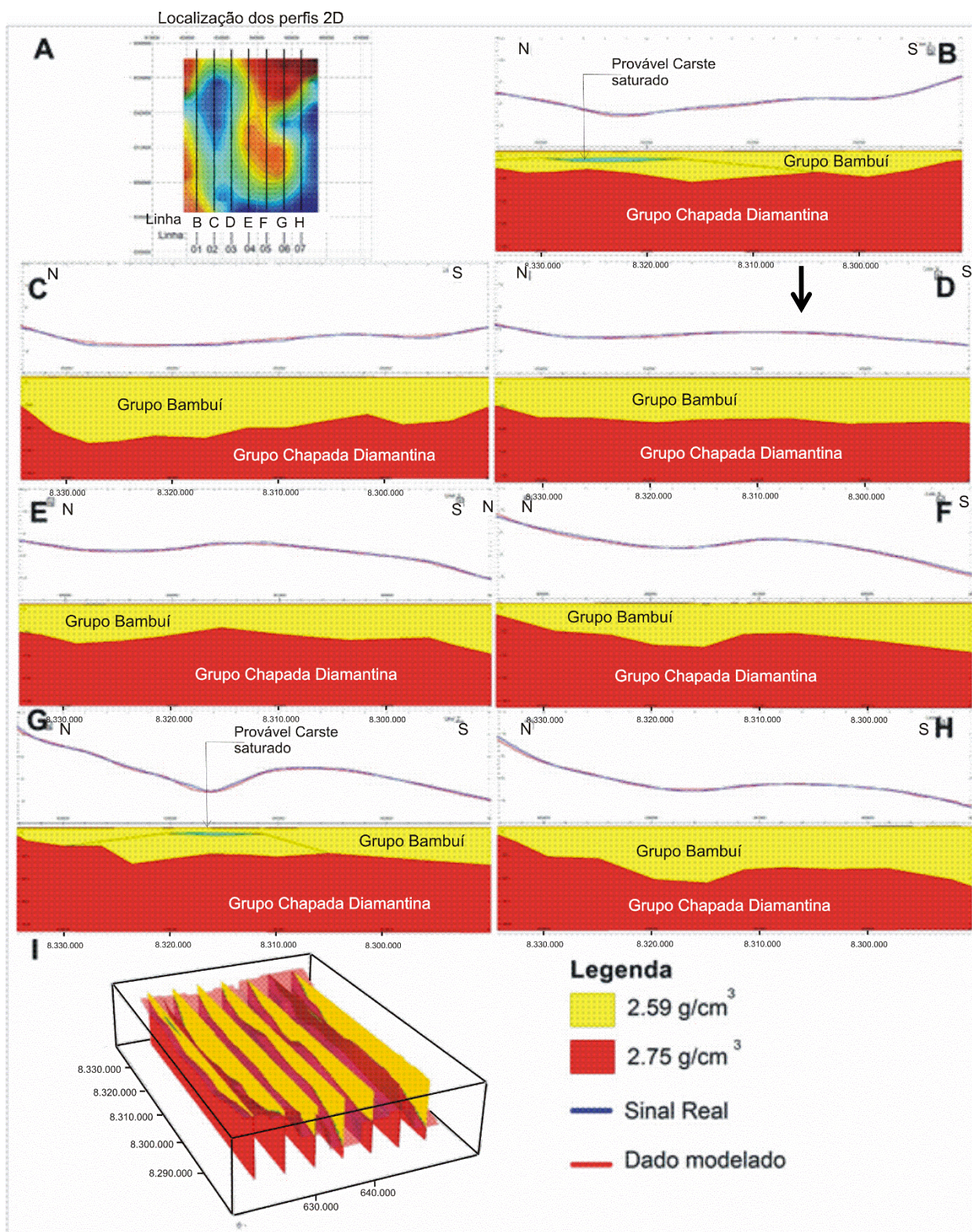


Figura 11.11: Modelagens 2D e 3D da região de Jaíba: (A) Localização dos perfis modelados; Seções N-S dos modelos nas coordenadas (B) 607024 m E, (C) 610943 m E, (D) 615147 m E, (E) 619114 m E, (F) 623271 m E, (G) 627285 m E, (H) 631346 m E; E (I) comparação dos perfis modelados 2D com a modelagem 3D.

Mapa de anomalia Bouguer residual

Dentre os mapas de anomalia Bouguer (Figuras 11.7, 11.8 e 11.9) destaca-se o de anomalias Bouguer residuais. As anomalias gravimétricas negativas que, nesses mapas, bordejam pelo leste e pelo oeste uma anomalia positiva alinhada norte-sul ficam perfeitamente compatíveis com o mapa de derivadas horizontais leste-oeste, mostrado na Figura 11.10A.

Ao nível atual de conhecimentos da região, não se pode dizer qual é o substrato geológico que condiciona os altos e baixos gravimétricos visualizados no mapa Bouguer residual. Segundo Iglesias & Uhlein (2009), o substrato do Grupo Bambuí estaria muito raso na margem esquerda do Rio São Francisco e se aprofundaria rapidamente na margem direita graças a um provável falhamento alinhado aproximadamente NNE-SSW, ao longo do qual este rio teria se instalado, cerca de 50 km a oeste de Jaíba (ver Figura 11.11). Referem-se ainda, esses autores, à ocorrência de rochas cristalinas em altos estruturais como o Alto de Januária, por exemplo. Silva *et. al.*, (1981), por sua vez, já se referiam a gnaisses e tonalitos cataclasados na estrada entre Januária e Barreiro, enquanto CPRM/COMIG (2003) mapeiam granulitos e migmatitos do Arqueano no fundo de alguns vales entalhados no Urucuia, na margem esquerda do São Francisco. Nenhum dos autores citados, entretanto, se refere a rochas cristalinas na margem direita do São Francisco, nos cerca de 50 km entre este rio e a região de Jaíba.

O conjunto de informações acima indicado torna factível a admissão de grandes espessuras do Grupo Bambuí no bloco rebaixado, que deve incluir a região de Jaíba. Entretanto, não se pode decidir se o substrato deste grupo são os quartzitos do Grupo Chapada Diamantina, ou se são rochas cristalinas do Arqueano. Em qualquer das situações, entretanto, o contraste de densidades é suficiente para a manifestação de anomalias gravimétricas tais como as mostradas no mapa Bouguer residual da Figura 11.9. Assim, pode-se dizer que as zonas de resíduo positivo correspondem a altos do substrato gravimétrico, enquanto que as zonas de resíduo negativo, por outro lado, correspondem ao embasamento gravimétrico mais profundo

Mapa da derivada direcional E-W

Nos mapas de derivadas direcionais são rastreados os gradientes de gravidade na direção considerada. Gradientes fracos significam monotonia litológica, enquanto que gradientes fortes marcam a passagem lateral de uma litologia menos densa para outra mais densa, ou vice-versa. Isso significa muito frequentemente a presença de falhamentos importantes. O mapa de gradientes E-W (Figura 11.10A), com efeito, delineia uma anomalia gravimétrica positiva alongada, percorrendo a porção central da área, do extremo norte ao extremo sul. Essa anomalia é limitada lateralmente por faixas de fortíssimo gradiente, o que pode significar que a mesma está associada a uma feição em que as rochas do embasamento gravimétrico estariam alçadas formando um horst em profundidade, com cerca de dez quilômetros de largura. Na região de Jaíba, finalmente, o topo do substrato gravimétrico estaria muito profundo, mas seria tectonicamente muito acidentado, o que teria sido flagrado no mapa de derivadas direcionais E-W mostrado na Figura 11.10A.

Convém lembrar que, entre maio e dezembro de 2007, ocorreram vários pequenos sismos na região de Itacarambi, segundo o Observatório Sismológico da Universidade

de Brasília. Essa sucessão de tremores culminou com um abalo mais forte no dia 09/12/2007, de magnitude 4,9 (Chimpliganond, 2013) considerado significativo para os padrões brasileiros. O epicentro deste abalo situa-se nas imediações de Itacarambi, como mostrado na Figura 11.12 abaixo.

Mapa do topo do embasamento gravimétrico

A partir dos modelos com geometria 2D e 3D (Figura 11.11) e dos resultados dos cálculos de profundidade pela equação de Euler, foi possível obter um mapa de topo da superfície de contraste gravimétrico em profundidade (Figura 11.13). Esta superfície apresenta-se bastante movimentada, exibindo uma feição alongada norte-sul, no centro da área onde as cotas são da ordem de -2000 metros. Esta feição é ladeada, por duas faixas também norte-sul, onde as cotas são da ordem de -5000 metros. Foi adotada uma densidade de $2,75 \text{ g/cm}^3$ para o substrato e uma densidade de $2,59 \text{ g/cm}^3$ para os sedimentos que o recobrem. Embora as cotas obtidas não possam ser tomadas como absolutas, fica evidenciada aqui a estrutura tipo horst sugerida pelo mapa de derivadas E-W.

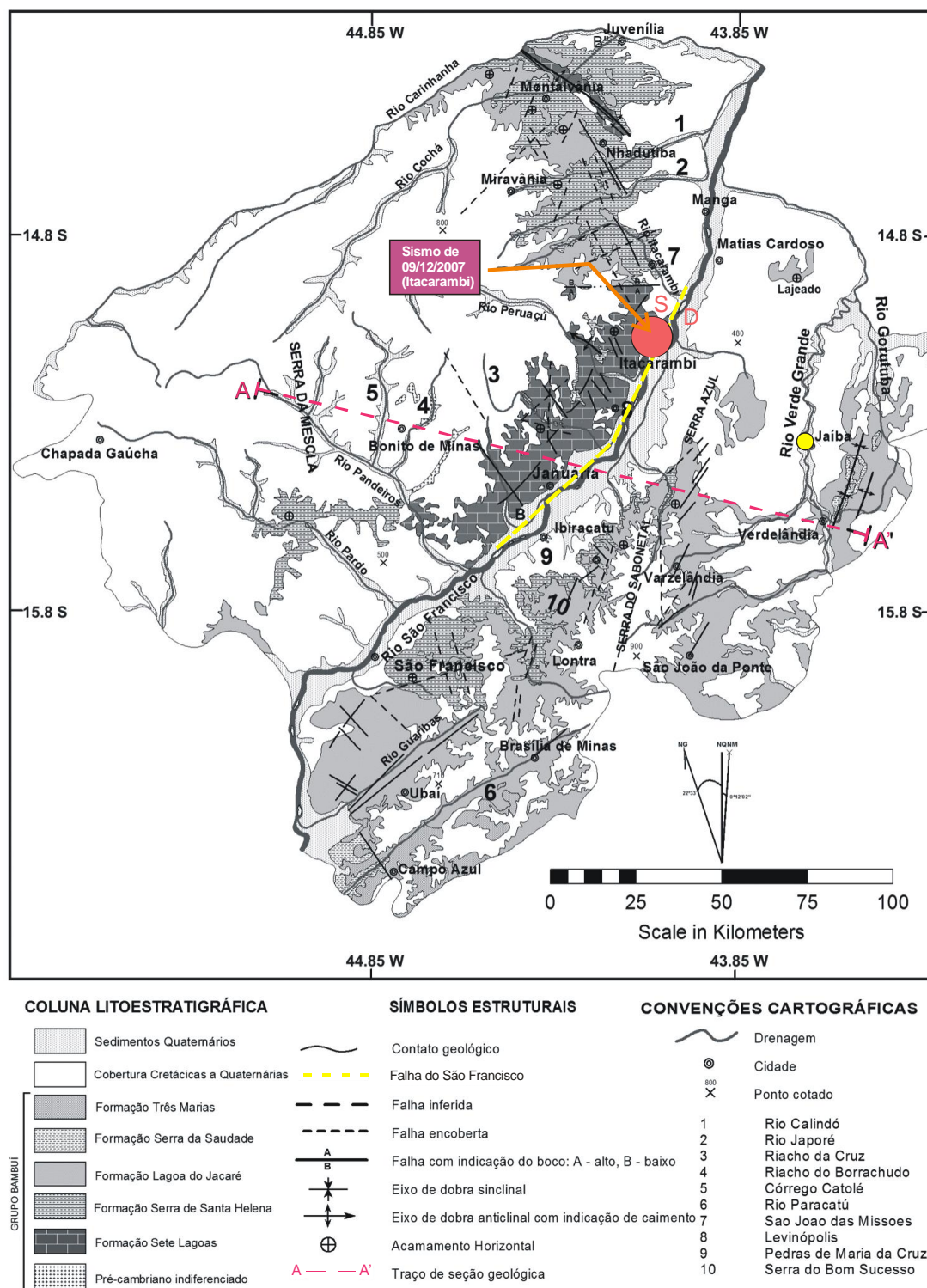


Figura 11.12: Provável falha do São Francisco. Modificado de Iglesias & Uhlein (200

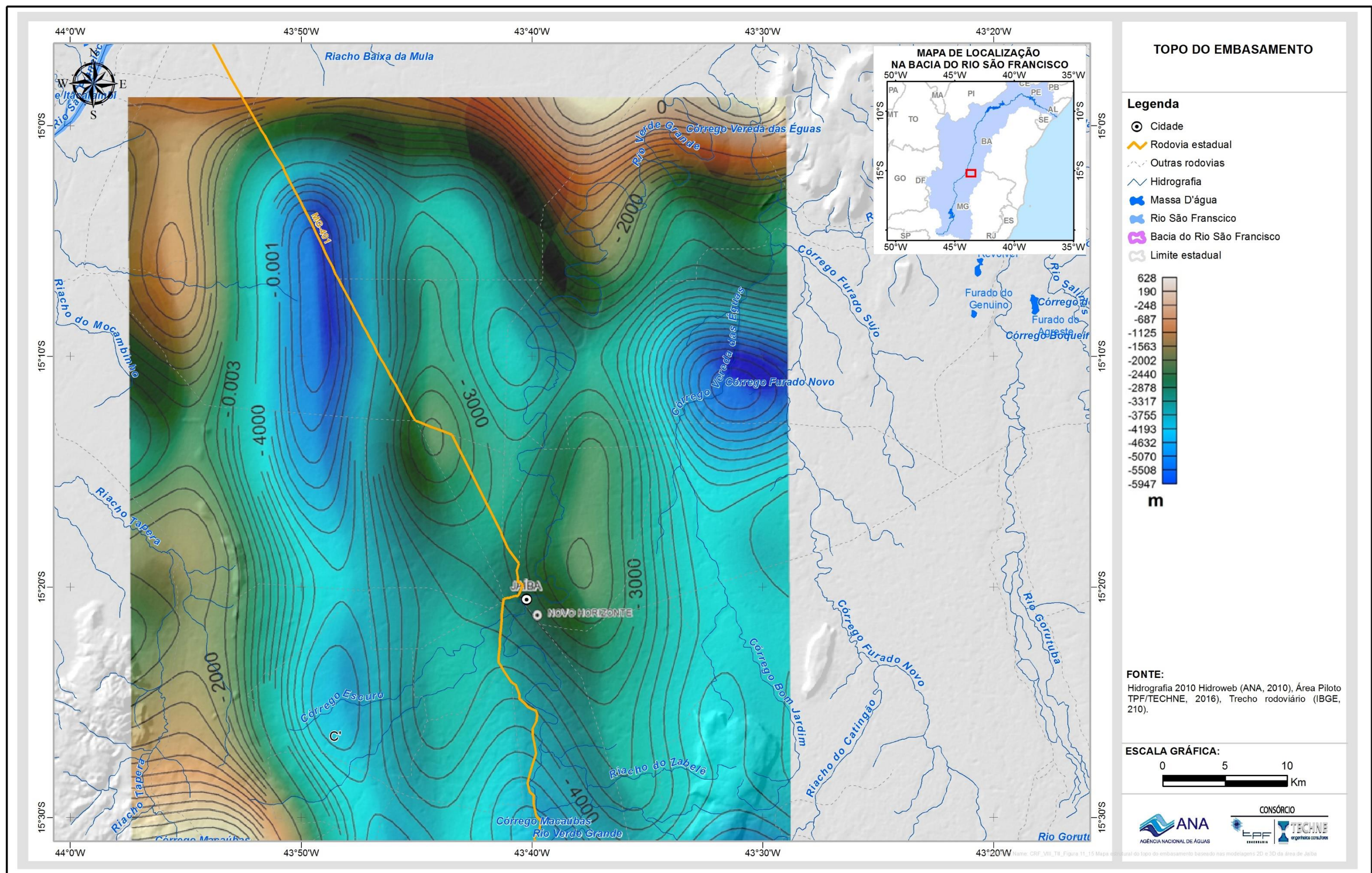


Figura 11.13: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da área de Jaíba. O desvio para as profundidades é de ± 100 m.

A convergência de informações parece confirmar a aptidão da eletrorresistividade, via índice de carstificação, na detecção e mapeamento de zonas mais intensamente carstificadas. Fica esboçado o panorama geral da área de Jaíba em termos de variabilidade elétrica e, conseqüentemente, da natureza física dos calcários. Os calcários aparentam ser muito homogêneos na maior parte da área coberta pelas medições. As anomalias do IC, sugestivas de carstificação significativa, são localizadas, mas podem ter dimensões importantes como, por exemplo, a primeira mancha de alto IC, que contém o sumidouro do rio Verde. Considerando os resultados obtidos recomenda-se uma eventual continuação dos estudos na área de Jaíba incluindo uma varredura mais densa por eletrorresistividade, nos moldes da varredura aqui realizada.

No que diz respeito à gravimetria, a quantificação acima apresentada reflete a configuração geral do topo do substrato gravimétrico, podendo ser considerada como uma aproximação qualitativa satisfatória da realidade no presente estágio de conhecimento do problema. As considerações de ordem geológica, particularmente no que diz respeito à falha do São Francisco, ficam aqui registradas como hipótese de trabalho para futuros estudos na região, visando a um melhor conhecimento da geologia de subsuperfície.

12. CONCLUSÕES

A área piloto do rio do Vieira corresponde à bacia hidrográfica deste rio, com uma área de 579 km². Localiza-se na região norte do estado de Minas, inclui toda a área urbana da cidade de Montes Claros e está totalmente inserida no município de Montes Claros. O aquífero que ocorre nessa área é o aquífero cárstico, desenvolvido nos 120 primeiros metros da Formação Lagoa do Jacaré do Grupo Bambuí. Este aquífero apresenta dois comportamentos distintos condicionados por características litológicas e topográficas distintas da Formação Lagoa do Jacaré. São eles:

- Aquífero cárstico desenvolvido na Formação Lagoa do Jacaré Inferior – Ocupa a porção leste da área piloto em cotas baixas e topografia relativamente plana. A litologia predominante é representada por uma alternância de metassiltitos e calcários exibindo carstificação discreta. A zona urbana de Montes Claros situa-se nessa porção.
- Aquífero cárstico desenvolvido na Formação Lagoa do Jacaré Superior – Ocupa a porção oeste da área piloto em cotas altas e topografia acidentada, com desnível médio da ordem de 120 metros em relação à zona urbana. A litologia predominante é representada por calcários escuros exibindo uma grande diversidade de feições cársticas amplamente distribuídas. É a principal área de recarga na área piloto.

Duas direções preferenciais de fraturamento NE-SW e NW-SE foram identificadas. Ao longo dessas direções se desenvolveram feições endocársticas e exocársticas, preferencialmente em altas cotas, na porção oeste da área piloto, em zona de domínio da Formação Lagoa do Jacaré Superior. Essas direções preferenciais foram ratificadas pela geofísica e pelos testes com traçadores.

A análise dos dados de vazão e profundidade dos poços existentes sugere que abaixo dos 120 metros dificilmente se encontram estruturas cársticas. Assim sendo, considera-se que o chamado Aquífero Lagoa do Jacaré, desenvolvido em rochas cársticas da Formação Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí, tem no máximo 120 metros de espessura. As vazões, nesse aquífero, variam comumente entre 20 e 30 m³/h na zona urbana de Montes Claros. Observam-se, entretanto, zonas isoladas onde as vazões ficam acima de 40,0 m³/h. Nessas zonas os valores podem chegar a, 100,0 m³/h. Essas zonas são, aparentemente, alinhadas nas direções NNE-SSW, E-W e NW-SE.

Os levantamentos geofísicos sugerem que os calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior têm expressividade aquífera maior que os metasiltitos e calcários da porção inferior dessa formação. Sugerem também um extravasamento para sudeste da área piloto dos calcários aquíferos da Formação Lagoa do Jacaré Superior, com sedimentos carbonatados com espessura mínima de 1.600 metros e com espessura saturada não ultrapassando 120 metros.

As recargas que ocorrem na área piloto são da ordem de 7,2% da pluviometria anual média local, considerada como 1.100,0 mm. Isso equivale, em termos médios, a 46,0 hm³/ano. Essas recargas foram avaliadas a partir dos dados históricos de deflúvios (30 anos) registrados nas estações fluviométricas de Ponte dos Ciganos, Claro dos Poções e Colônia do Jaíba.

As reservas e recursos hídricos subterrâneos avaliados são mostrados na Tabela 12.1 a seguir:

Tabela 12.1 – Síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos.

Reservas	Saturação (hm ³)	6.950,00
	Sob Pressão (hm ³)	--
Exploração	Efetiva (hm ³ /ano)	39,00
	Instalada (hm ³ /ano)	334,00
Recarga (hm ³ /ano)		46,00
Reserva Explotável (hm ³ /ano)		14,00
Saldo da exploração (hm ³ /ano)		-25,00

Comparando o valor de recarga apresentado na Tabela 12.1 (46,0 hm³/ano,) obtido a partir da análise de 30 anos de recessão em três bacias distintas, aos valores explotados, pode-se observar que a exploração de água subterrânea vem se fazendo em regime de exaustão, de modo que eventuais incrementos de descarga merecem ser ponderados com cautela.

O aquífero Bambuí na bacia do Rio do Vieira apresenta águas pouco mineralizadas, com sólidos totais dissolvidos inferiores a 700 mg/L, classificadas como doces e toleráveis para o consumo humano. Os resultados de pH apresentam valores oscilando desde levemente ácidos a levemente alcalinos, com média e mediana em torno de 7,0. A dureza dessas águas varia de pouco a muito dura, com predominância de águas muito duras (>200 mg/L). Apenas os parâmetros ferro e manganês apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano. Os parâmetros

específicos (metais pesados, agroquímicos e derivados de petróleo) apresentam em todos os casos valores inferiores ao máximo permitido pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde. Em relação aos agroquímicos e derivados de petróleo os valores apresentaram-se abaixo do limite de detecção para todas as amostras, e no caso dos metais arsênio, boro, bário, chumbo, cobre e zinco foram detectados apenas traços.

A área piloto do rio do Vieira tem 94% da sua área diagnosticados como de alta vulnerabilidade e 6% de vulnerabilidade média. Toda e qualquer ocorrência de fontes contaminantes de elevada intensidade é considerada, portanto, como de alto perigo de contaminação. Essas fontes contaminantes estão concentradas na área urbanizada do município de Montes Claros, onde se tem um grande número de postos de combustível e esgotamentos sanitários, além de cemitérios. Destaca-se que toda a área de ocorrência dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior, em especial a área do Parque Estadual da Lapa Grande, constitui importante área de recarga do aquífero cárstico captado na zona urbana de Montes Claros.

Com uma população de aproximadamente 400.000 habitantes e uma taxa de consumo de 117,8 L/hab/dia chega-se a uma demanda de 17,0 hm³/ano, se aproximando da capacidade de produção dos três sistemas de produção de água da COPASA (18 hm³/ano). Medidas de restrição e controle, como rodízio no abastecimento, perfuração de novos poços tubulares apoio de caminhões-pipa, já são realizadas, fazendo-se necessária a adoção de novas medidas, que serão indicadas no próximo capítulo.

13 PROPOSTAS DE GESTÃO

Algumas considerações sobre a região de Montes Claros são importantes para proposição de medidas de gestão e são descritas a seguir:

- O abastecimento público da cidade de Montes Claros é feito essencialmente com água de superfície e a disponibilidade atual desse recurso não é suficiente para o atendimento da demanda da cidade.
- Constata-se uma excessiva produção de água subterrânea (26,00 hm³/ano) a partir de poços concentrados preferencialmente na zona urbana e sua periferia. Essa descarga destina-se essencialmente ao abastecimento doméstico, extra Copasa, da população. É necessário **iniciar um monitoramento sistemático de níveis e vazões de poços** para que se possa concluir sobre a real situação da exploração de água subterrânea em Montes Claros.
- Toda a área de ocorrência dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior, em especial a área do Parque Estadual da Lapa Grande, constitui importante área de recarga do aquífero cárstico captado na zona urbana de Montes Claros. O órgão gestor de Minas Gerais, bem como a Prefeitura Municipal de Montes Claros, devem prover as **medidas necessárias à proteção ambiental dessa área**.
- Foram cadastradas dezesseis surgências nas encostas leste dos calcários da Formação Lagoa do Jacaré Superior, entre fontes e lagoas, testemunhando o repasse hídrico desses calcários para os aquíferos da planície. É muito provável que, num cadastramento visando especificamente às fontes, um número muito maior de surgências se revele nas encostas leste dos calcários.
- Recomenda-se a utilização do método geofísico elétrico na locação de poços tubulares profundos, considerando os resultados que esse método vem alcançando na detecção de zonas mais intensamente carstificadas em rochas carbonáticas.
- Recomenda-se **realizar periodicamente o cadastro de poços** (a cada dois anos).
- Recomenda-se, ainda, a regulamentação de todos os usuários (dispensa ou outorga de direito de uso) e a **proibição de novas perfurações de poços por um período mínimo de 02 anos**.
- Implementar **campanhas constantes de fiscalização** em parceria com os órgãos gestores estaduais e municipais.

Além da aplicação das medidas descritas acima, o monitoramento qualiquantitativo é fundamental para a região. Os estudos hidroquímicos realizados mostram que ferro e o manganês apresentam, em 40% das amostras, teores acima do Valor Máximo Permitido (VMP) para águas de consumo humano de acordo com os padrões de potabilidade.

Acrescenta-se, ainda, a importância da preservação das águas subterrâneas do Parque Estadual da Lapa Grande, uma vez que o mesmo **é responsável**

direto pela recarga e manutenção da qualidade das águas da porção urbana de Montes Claros.

Na parte urbana de Montes Claros, embora não tenha sido detectado nenhum parâmetro químico acima dos valores de referência, é importante, também, o seu monitoramento para verificar a eficácia da recarga proveniente da área do Parque, notadamente por se tratar de uma área urbana em que, naturalmente, existe uma variedade de fontes potenciais de contaminação. Dessa forma, faz-se necessário acompanhar com atenção os teores dos compostos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato) e do cloreto, como indicadores de contaminações por efluentes domésticos e por metais nas áreas de indústria.

A Tabela 13.1 e Figura 13.1 apresentam proposta de localização dos poços para compor a rede de monitoramento na Bacia do Rio Vieira.

Tabela 13.1 – Coordenadas dos poços de monitoramento da rede proposta para a área piloto do Rio Vieira.

Poços de Monitoramento	Coordenadas X	Coordenada Y
PM01	-43,9335	-16,5837
PM02	-43,9141	-16,6463
PM03	-43,9848	-16,6523
PM04	-43,9739	-16,7167
PM05	-44,0175	-16,7258
PM06	-43,9929	-16,7709
PM07	-43,8997	-16,7578
PM08	-43,8511	-16,7318
PM09	-43,8448	-16,7125
PM10	-43,8181	-16,7381
PM11	-43,8441	-16,6699
PM12	-43,887	-16,6825

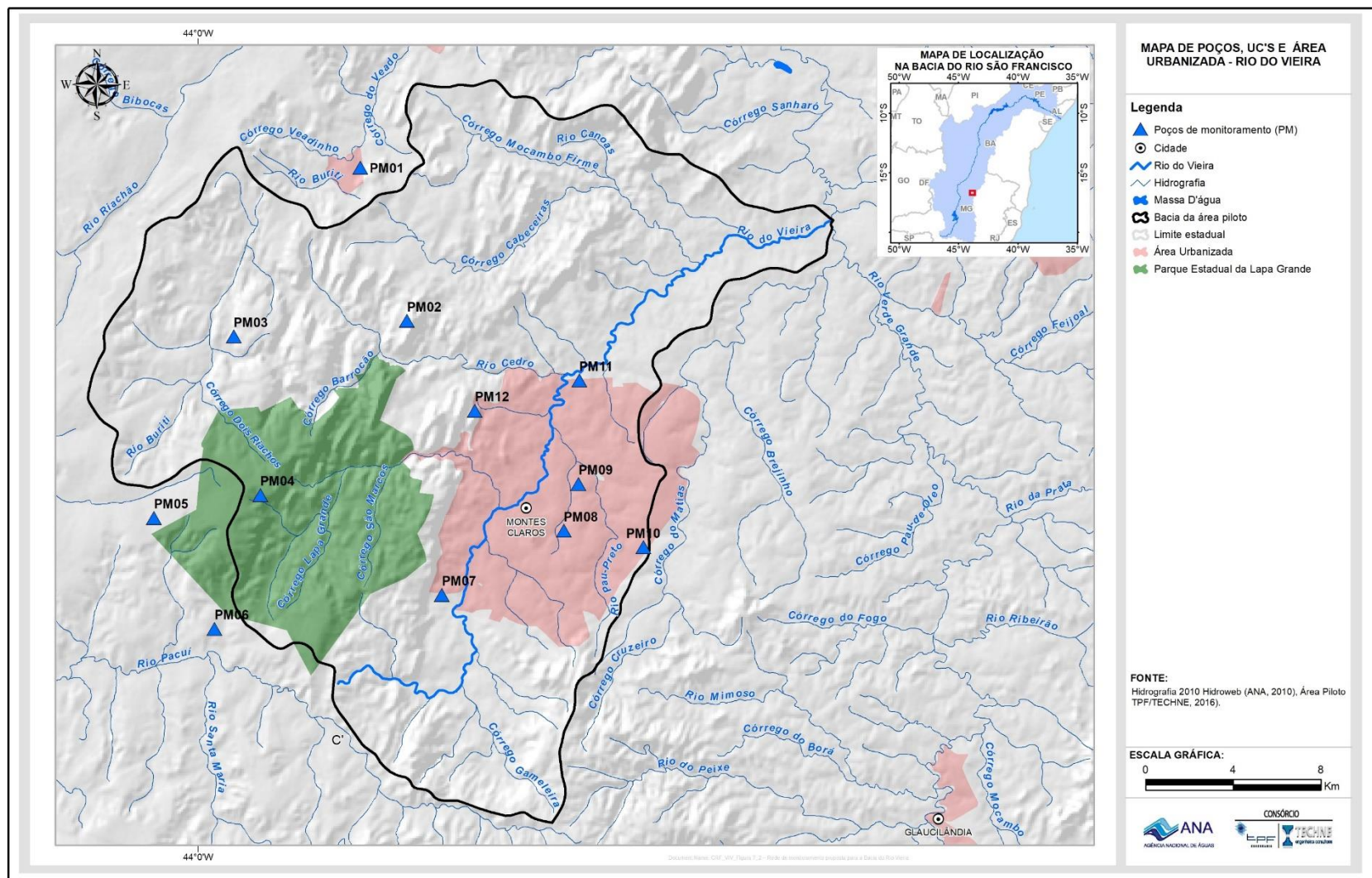


Figura 13.1 – Rede de monitoramento proposta para a Bacia do Rio Vieira

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agurto-Detzel, H., Assumpção, M.S., Ciardelli, C., Albuquerque, D.F., Barros, L.V., França, G.S.L. The 2012–2013 Montes Claros earthquake series in the São Francisco Craton, Brazil: new evidence for non-uniform intraplate stresses in mid-plate South America. *Geophys. J. Int.* 200, 216–226. doi: 10.1093/gji/ggu333. 2015.
- Aksoy, H.; Wittenberg, H.; ERIS, E. 2014. Hydrograph Analysis and Baseflow Separation. *In: Handbook of Engineering Hydrology: Fundamentals and Applications*, pp. 311-328.
- Allkmin, F.F. & Martins-Neto, M.A., 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In: Pinto, C.P. e Martins-Neto (Org.). Bacia do São Francisco: geologia e recursos minérios.* Belo Horizonte: SBG/MG, 2001. p. 09-30.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Cadernos de Recursos Hídricos - Volume 2 - Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. 126p. 2007.
- ANA - Agência Nacional de Águas Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande – Relatório Síntese. 180p. 2011.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. 2013.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande. Plano de Ações. 2010.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande. 2013.
- APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21. ed. Washington: APHA, 2005. Washington: American Public Health Association. 1082 p.
- Barbosa, V. V. Ecoturismo na região da Lapa Grande. Montes Claros: Editora UNIMONTES, Revista Verde Grande, volume I, nº 2/2005.
- Barenblatt, G.E; Zheltov, I.P. & Kochina, I.N. 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *J. Appl. Math. Mech. USSR.* 24(5),1286-1303. 1960.
- Boegli, A. Karsthidrology and physical speleology. Nova York: Springer, 1980. p.13-17. 1980.
- Bonfim, L.F.C. e Gomes, R.A.A.D. 2004. Aquífero Urucua – Geometria e Espessura: Idéias para discussão. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13, Cuiabá (MT).
- Borges, L. Qualidade da água do Rio Vieira sob a influência da área urbana de Montes Claros - MG. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Uberlândia, 2007.
- Boulton, N.S. Analysis of data from non equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 26. 469-482. 1963.

- Brann O.P.G. 1970. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. Revista Brasileira de Geografia, 32:3-39. Citado em: Sgarbi G.N.C., Sgarbi P.B. de A., Campos J.E.G., Dardenne M.A., Penha U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozoico da bacia do São Francisco. In: Pinto C.P. e Martins-Neto M.A. (eds) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG/MG, p. 93-138.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL. Projeto RADAMBRASIL. Folha SC.19 Rio Branco: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1976. 464p. (Levantamento de recursos naturais, v.12).
- BRASIL/DOU Nº 239 de 14/12/2011. Seção 1, p.39, Ministério da Saúde, Gabinete do Ministro, Portaria Nº 2.914, de 12/12/2011.
- BRASIL/MMA. Quarto Relatório Nacional para a Convenção Sobre Diversidade Biológica BRASIL. Brasília 2011.
- CAMPOS J.E.G & DARDENNE M.A. 1997a. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. Rev. Bras. Geoc., 27(3):283-294.
- CAMPOS J.E.G & DARDENNE M.A. 1997b. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. Rev. Bras. Geoc., 27(3):269-282.
- CAMPOS J.E.G & DARDENNE M.A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências, 27(3):269-294. 1997.
- CAMPOS, J. E. G. Estratigrafia, sedimentação, evolução tectônica e geologia do diamante da porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana. Tese de doutorado em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 1996.
- CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B. da; FOLEGATTI, M.V.; COSTA, J.R.; CRUZ, F.A. da. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.14, p.108-116, 2006.
- Castro P. T. A., Dardenne M.A. 2000. O conglomerado Samburá (Grupo Bambuí, neoproterozoico) e rochas sedimentares associadas no flanco leste da serra da Pimenta, SW de Minas Gerais: um sistema de Fan-delta. Geonomos, 3 (2):35-41.
- Castro P.T.A., Dardenne M.A. 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. Revista Brasileira de Geociências 30, 345-437.
- Caxito F.A. 2010. Evolução tectônica da Faixa Rio Preto, Noroeste da Bahia / Sul do Piauí. Dissertação de Mestrado, IGC-UFMG, Belo Horizonte, 151 p.
- CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Contrato de Gestão nº 014/2010 - Ato Convocatório nº 015/2014.
- Chaves, M.L.S.C.; Andrade, K.W.; Benitez, L. Geologia integrada das Folhas Jequitaí, Bocaiúva e Montes Claros (1:100.000), norte de Minas Gerais. GEONOMOS, 19(2), 1-7, IG/UFMG. 2011

- Chiavegatto J. R. S.; Gomes, N. S.; Dardenne, M. A.; Delgado, C. E. R. 2003. Estratigrafia do Grupo Bambuí nas regiões do Norte de Minas Gerais: uma nova unidade estratigráfica em um contexto de inversão de bacia. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 12, Ouro Preto. Anais. Ouro Preto: SBG, 2003. p. 24.
- Chimpliganond, C.N., 2013. Estudos sobre a sismicidade de Caraíbas-Itacarambi, Minas Gerais: causas e características. Tese de doutorado apresentada à Universidade de Brasília – Instituto de Geociências Curso de Pós-Graduação em Geologia (tese no 111).
- Collischonn, W. & Tassi, R., 2008. Introduzindo Hidrologia. Rio Grande do Sul. UFRGS.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 28, DE 7 de Dezembro de 1994. Art. 1º.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2010). Banco de poços SIAGAS, versão 2010. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acessado em diferentes ocasiões entre 2013 e 2015.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil e CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Mapa geológico do estado da Bahia. 2003. Escala 1:1.000.000. Carta geológica do Brasil ao Milionésimo.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil e COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais. Mapa geológico do estado de Minas Gerais, 1:1.000.000. 2003.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil e UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil Levantamentos Geológicos Básicos: Geologia da Folha Jequitai (SE.23-X-C-II), escala 1:100.000. Contrato nº 059/PR/05, Brasília. Autores: Mario Luiz de Sá C. Chaves, Leila Benitez. Coordenação: Antônio Carlos Pedrosa Soares. 2007.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2007. Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Urucuia: Bacias Hidrográficas dos Rios Arrojado e Formoso. Rede Cooperativa de Pesquisa sobre o COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIÃO SEMI-ÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO, META C.
- CPRM/COMIG, 2003. Mapa geológico do estado de Minas gerais, 1:1.000.000.
- Custodio E. & Llamas M.R. Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Ômega, v. 2. 1983.
- Da Luz, J.A.G.; Costa, A.T.; Campos, J.C.V. Avaliação Sobre as Condições Atuais de Exploração dos Poços e Dinâmica de Fluxo do Aquífero Urucuia. ICADS-UFBA / Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). 2009.
- De Carvalho, D. F. e Da Silva, L.D.B. 2006. Apostila de Hidrologia – Capítulo 3 – Bacia Hidrográfica. Rio de Janeiro/RJ - UFRJ. P.21 e 22. Agosto/2006.
- Doerfliger, N. Zwahlen, F. Groundwater vulnerability Mapping in karst regions (EPIK). 1998.

- Domenico, P.A. & Schwartz, F.W., 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. 2nd edition, New York, John Wiley and Sons.
- Eckhardt, K., 2005. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. Hydrological Processes, 19(2):507-515.
- Egydio-Silva M. 1987. O sistema de dobramentos Rio Preto e suas relações com o Cráton São Francisco. Tese de doutorado, IGC-USP, São Paulo, 95 p.
- Egydio-Silva M., Karmann I. & Trompette R.R. 1989. Litoestratigrafia do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí no noroeste do estado da Bahia. Revista Brasileira de Geociências, 19(2):101-112.
- EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 2006.
- 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.
- Fetter, C.W., 1994. Applied Hydrogeology, 3rd ed.: Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616 p.
- Ford, D.; Williams, P. Karst Hydrogeology and Geomorphology. 2007.
- 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
- Freeze. R.A. & Cherry, J.A. Groundwater. Prentice Hall. 1979.
- Galvão, A.L.O.; Ferreira, C.F.; Rossato, R.M.; Reino, J.C.R.; Jansen, D.C.; Vilela, C.V. 2012. Breve descrição do patrimônio espeleológico do município de São Desidério – BA. Revista Brasileira de Espeleologia. RBEsp. Volume 2(1).
- Gaspar, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. Tese de doutorado em Geologia. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília, 2006. 158 p.
- Godinho, L.P.S.; Pereira, R.G.F.A. 2013. Caracterização geomorfológica preliminar do sistema cárstico do Rio João Rodrigues, São Desidério – BA. In: Rasteiro, M.A.; Morato, L. (orgs.) Congresso Brasileiro de Espeleologia, 32, 2013. Barreiras. Anais... Campinas: SBE, 2013. p.341-351. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_341-351.pdf>. Acesso em: data do acesso.
- Hem, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. United States Geological Survey Water-Supply Paper, USGS, 1986, n. 2254.

- Hidrovia – Hidrogeologia e meio ambiente. 2009. Estudos espeleológicos-ambientais. Licenciamento da BR-135/BA. (Sub-trecho São Desidério - Correntina). Relatório Técnico Final.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, v. 56. Boulder.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Manual Técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro 1992.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=314330>> Acesso em agosto de 2015.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de unidades de relevo do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro. 2006.
- 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, 256-266, São Paulo.
- Iglesias, M. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências, UFMG, Belo Horizonte, 121p. 2007.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil, 1961-1990. Disponíveis em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>
- Jacomine, P. K. T. A nova classificação brasileira de solos. In: Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica, vols 5 e 6, p. 161-179. 2008-2009.
- Kuchenbecker, M., Atman, D., Costa, R.D. 2013A. Mapa geológico 1:100.000 da Folha Barreiro do Jaíba. CODEMIG. Disponível em: www.portaldageologia.com.br/mapa.html
- Kuchenbecker, M.; Soares, A. C. P. O Grupo Bambuí na folha Luz (SE-23-Y-V). Geonomos. UFMG, 2010.
- Leite, M. E.; Santos, I. S. & Almeida, J. W. L. Mudança de uso do solo na Bacia do Rio Vieira, em Montes Claros/MG. In: Revista Brasileira de Geografia Física 04, p. 779-792. 2011.
- Magalhães, I. A. L.; Nery, C. V. M.; Zanetti, S. S.; Pena, F. E. R.; Avelino, R. C.; Santos, A. R. Uso de geotecnologias para estimativa de perda de solo e identificação das áreas susceptíveis a erosão laminar na sub-bacia hidrográfica do Rio do Vieira, município de Montes Claros, MG. In: Cadernos de Geociências, Vol.9, n. 2. Novembro, 2012.
- Manoel Filho, J. 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. 1996.

- McNeely, R.N.; V.P. Neimanis; L. Dwyer, 1979. Thallium. In: Water quality sourcebook. A guide to water quality parameters.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Água – um recurso cada vez mais ameaçado. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/secex_consumo/arquivos/3%20-%20mcs_agua.pdf Acesso em agosto de 2015.
- Oliveira, M.A.M. Contribuição à geologia da parte sul da bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobras, Relatório de Exploração 1, Rio de Janeiro, RJ. 1967.
- Orellana, E. Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua. Paraninfo, Madrid, 1972.
- Pessoa, P.F.P. & Loureiro, C.O.L. Investigações Hidrogeológicas na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG - Informações Preliminares. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá/MT. 2004.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions American Geophysical Union 25: 914 – 923.
- Prefeitura Municipal de Montes Claros/MG. <http://www.montesclaros.mg.gov.br/> Acesso em agosto de 2015.
- PROÁGUA/IGAM. Estudos Hidrogeológicos da Bacia do Rio Riachão, 69p. 2001
- Ramos, A.M. e Silva, F.F. 2002. Contribuição dos mananciais Superficiais do Estado da Bahia para o Rio São Francisco. In: ABRH, Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 6, Maceió, CD-ROM.
- Rocha, A. M.; Morais, G. R.; Leite, M. E. Análise Morfométrica da Bacia do rio Vieira, Montes Claros – MG. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa – PB, Brasil. 25 a 29 de abril de 2015. INPE.
- Rocha, Ícaro Santos; Oliveira, Rachel Inêz Castro de, 2014. Sismos em Montes Claros/Norte de Minas Gerais. Anais do VII CBG.
- Schiavetti, A; Camargo, A. F. M. (orgs.). 2002. Conceitos de bacia hidrográfica, teorias e aplicações. Bahia: Editus. 293 p.
- Secretaria Municipal de Desenvolvimento econômico, turismo, ciência e tecnologia. Prefeitura Municipal de Montes claros. Coletânea de informações sobre o município de Montes Claros. In: Revista Nova História – Ano I, Nº 3 – agosto de 2004. Disponível em <http://www.montesclaros.mg.gov.br/desenvolvimento%20economico/diVind-com/pdf/Dados%20Gerais%20da%20cidade%20de%20Montes%20Claros.pdf> Acesso em agosto de 2015.
- Sgarbi G.N.C., Sgarbi P.B. DE A., Campos J.E.G., Dardenne M.A., Penha U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozoico da bacia do São Francisco. In: Pinto C.P. e Martins-Neto M.A. (eds) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG/MG, p. 93-138.

- SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática
<<http://www.sidra.ibge.gov.br/>> Acesso em agosto de 2015.
- Silva, D.G., Melo R.F.T. e Corrêa, A.C.B. 2009. Revista de Geografia. A influência da densidade de drenagem na interpretação da evolução geomorfológica do complexo de tanques do município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, nordeste do Brasil. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 26, n. 3, jun/ago. 2009.
- Silverman, B.W. 1986. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall.
- Solon, F.F. Caracterização eletromagnética de formações da bacia de São Francisco, Brasil. Trabalho de Graduação, Universidade Federal Fluminense. 70 p. 2010.
- Souza, J.C.L., 2013. Recursos hídricos: breves considerações sobre o sistema de abastecimento de água no município de Montes Claros/MG e a percepção dos cidadãos em relação ao uso da água. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade/vol.3 n.2.
- Stiff, H.A. Jr. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology 3 (10):15 - 17.
- Streltsova-Adams, T.D. Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. *In*: Advances in Hydroscience. Ven Te Chow (ed). 11 (1978). Academic Press. 1978.
- Uhlein, A., Baptista, M.C., Seer, H.J., Caxito, F.A., Uhlein, G.J., Dardenne, M.A. 2011. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional de Leque Submarino em Bacia de Ante-País. Geonomos 19(2), 163-172.
- Uhlein, A.; Caxito, F.A.; Sanglard, J.C.D.; Uhlein, G.J.; Suckau, G.L. 2011. Estratigrafia das faixas neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco. Geonomos, 19(2), 8:31.
- Universidade de Moscou, 2001. Manual do programa IPI2Win v2.1 de processamento de dados das Sondagens Elétricas Verticais. 25p.
- Viana, H. S.; Ventura, E. P. (Orgs.). Projeto de cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, Estados de Minas Gerais e Bahia: Diagnóstico do município de Guaraciama, MG. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Belo Horizonte: CPRM, 2004.

