



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

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



## **República Federativa do Brasil**

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

## **Ministério do Meio Ambiente**

Edson Duarte

Ministro

## **Agência Nacional de Águas**

### **Diretoria Colegiada**

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

## **Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP**

Tibério Magalhães Pinheiro

Victor Sucupira

## **Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB**

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Leonardo de Almeida (Gestor do Contrato)

Márcia Tereza Pantoja Gaspar

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

---

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

---

***RELATÓRIO FINAL***

***VOLUME III – ÁREAS PILOTO***

***TOMO 3 - ÁREA PILOTO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO JUÁ/BA***

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

Capa:

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

Fotografia – Rangel Carvalho

Equipe:

#### **Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF:**

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

#### **Elaboração e Execução - Consórcio TPF/TECHNE**

##### **Direção Geral e Coordenação do Contrato**

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

##### **Membros da Equipe Chave**

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

##### **Membros da Equipe Técnica Executora**

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

Todos os direitos reservados

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

**A265h** Agência Nacional de Águas (Brasil).  
Hidrogeologia dos ambientes cársticos da Bacia do São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Final – Volume III – Áreas Pilotos - Tomo 3 – Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá/BA / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio TPF - Techne. - Brasília: ANA, 2018.  
479p.

1. Hidrogeologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. São Francisco, Rio  
I. Título.

**CDU 556.51**

## **APRESENTAÇÃO**

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

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

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

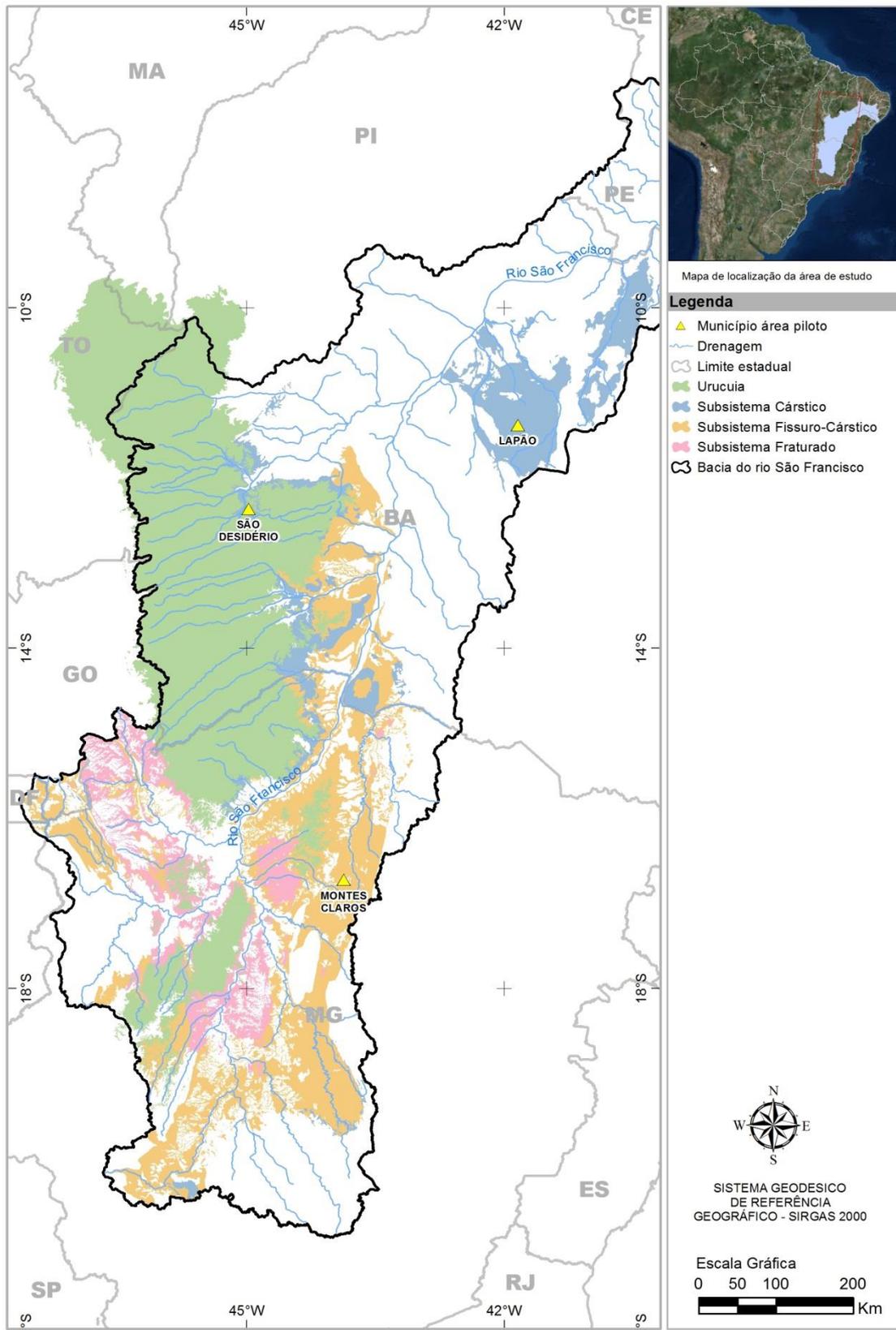
Os Sistemas Aquíferos Cársticos e Físsuro-Cársticos abordados no presente estudo apresentam uma área de exposição de 110.951,4 km<sup>2</sup>. Nessa área foi dada ênfase a 3 pilotos localizados nas bacias do Rio do Vieira (Montes Claros/MG), Rio São Desidério (São Desidério/BA) e Riacho do Juá (Lapão/BA) (Figura 1).

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

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

E ainda três Relatórios Técnicos Temáticos:

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



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

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

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

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

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

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	39
2. Localização e aspectos socioeconômicos .....	40
2.1 Análise dos dados socioeconômicos .....	40
2.1.1 <i>Metodologia de análise</i> .....	40
2.1.2 <i>Aspectos socioeconômicos da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá</i> .....	40
2.1.3 <i>Demanda Hídrica da Área Piloto do riacho do Juá</i> .....	52
3. Meio Físico.....	60
3.1 <i>Rede de Drenagem</i> .....	60
3.1.1 <i>Densidade de drenagem</i> .....	63
3.2 <i>Unidades de solo</i> .....	63
3.3 <i>Classes de vegetação</i> .....	69
3.4 <i>Declividade</i> .....	70
3.5 <i>Geomorfologia</i> .....	74
3.5.1 <i>Chapada de Irecê</i> .....	74
3.5.2 <i>Baixada dos Rios Jacaré/Verde</i> .....	77
3.5.3 <i>Serras da Chapada Diamantina</i> .....	77
3.6 <i>Uso e ocupação do solo</i> .....	79
4. Geologia.....	83
4.1 <i>Geologia regional</i> .....	83
4.2 <i>Geologia local</i> .....	86
4.2.1 <i>Grupo Chapada Diamantina</i> .....	88
4.2.2 <i>Grupo Una</i> .....	91
5. Geofísica.....	134
5.1 <i>Gravimetria</i> .....	134
5.1.1 <i>Modelagem com geometria 2D e 3D</i> .....	139
5.1.2 <i>Resultados obtidos</i> .....	139
5.2 <i>Eletrorresistividade</i> .....	150
5.2.1 <i>Área piloto</i> .....	150
5.2.2 <i>Detalhamento da área de Lapão</i> .....	167
5.3 <i>Perfilagem óptica e geofísica de poços</i> .....	186

6. Hidrogeologia.....	196
6.1 Parâmetros hidrodinâmicos da Bacia do Riacho do Juá.....	201
6.1.1 Teste Fazenda Gameleira – João Dourado/BA .....	201
6.1.1.1 Poço bombeado Marcos Moreira – Fazenda Gameleira.....	208
6.1.1.2 Poço PO-1 – Cleber Fazenda Gameleira a 225 m.....	210
6.1.1.3 Poço PO-2 – Valdenir Fazenda Gameleira a 423 m.....	211
6.1.1.4 Poço PO-3 – Ananias Fazenda Gameleira a 986 m .....	211
6.1.1.5 Poço observado PO-1 – Cleber Fazenda Gameleira a 225 m.....	212
6.1.1.6 Poço observado PO-2 – Valdenir Fazenda Gameleira a 423 m ....	214
6.1.1.7 Poço observado PO-3 – Ananias Fazenda Gameleira a 986 m.....	215
6.1.2 Teste Fazenda Israel– Uibaí/BA .....	216
6.1.2.1 Poço bombeado PB Gildázio .....	219
6.1.2.2 Poços de observação PO-1 – Gildázio a 929 m .....	221
6.1.2.3 Poços de observação PO-2 – Leda a 1028 m .....	222
6.1.3 Teste Fazenda Jatobá – Uibaí/BA .....	225
6.1.3.1 Poço observado PO-3 a 99 m na Fazenda Jatobá .....	230
6.1.4 Teste Fazenda Morro Pelado I - Lapão BA.....	232
6.1.4.1 Poço observado a 195 m de distância na Faz. Morro Pelado I.....	237
6.1.5 Teste Serrolândia – Presidente Dutra/BA .....	239
6.1.5.1 Poços de observação .....	243
6.1.6 Síntese dos parâmetros hidrodinâmicos da Bacia do Riacho do Juá	247
6.2 Recargas e exutórios .....	248
6.2.1 Considerações hidrogeológicas e hidrológicas.....	251
6.2.2 Procedimentos metodológicos de estudo .....	254
6.2.3 Resultados de quantificação de recarga.....	257
6.2.4 Considerações finais.....	263
6.3 Reservas, recursos e exploração.....	264
6.3.1 Reservas permanentes.....	265
6.3.2 Reserva reguladora ou recarga .....	265
6.3.3 Exploração .....	266
6.3.4 Síntese da Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos.....	266

6.4	Exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá .....	267
6.4.1	<i>Tratamento Estatístico dos Dados de Poços</i> .....	268
6.4.2	<i>Produção global dos poços</i> .....	275
6.4.3	<i>Zoneamento da Exploração</i> .....	278
7.	Hidroquímica.....	282
7.1	Amostragem de águas.....	282
7.1.1	<i>Rede de Amostragem</i> .....	283
7.1.2	<i>Procedimentos de Coleta</i> .....	285
7.1.3	<i>Métodos de Análise</i> .....	287
7.2	Caracterização das Águas .....	289
7.2.1	<i>Avaliação da distribuição dos dados físico-químicos e químicos...</i>	289
7.2.2	<i>Avaliação do efeito sazonal na hidroquímica</i> .....	297
7.3	Avaliação hidrogeoquímica .....	304
7.3.1	<i>Estatística descritiva</i> .....	305
7.3.2	<i>Fácies hidroquímicas</i> .....	340
7.3.3	<i>Parâmetros específicos</i> .....	349
7.3.4	<i>Qualidade das águas para o consumo humano</i> .....	351
7.4	Avaliações isotópicas.....	358
7.4.1	<i>Isótopos estáveis de Oxigênio (<math>\delta^{18}O</math>) e Deutério (<math>\delta^2H</math>)</i> .....	358
7.4.2	<i>Isótopos radiogênicos de Estrôncio (<math>^{87}Sr/^{86}Sr</math>)</i> .....	359
7.5	Considerações finais.....	360
8.	Avaliação da vulnerabilidade .....	361
8.1	Classes do parâmetro Epicarste (E) .....	362
8.2	Classes do parâmetro Cobertura de Proteção (P) .....	364
8.3	Classes do parâmetro Condições de infiltração (I) .....	366
8.4	Classes do parâmetro Grau de Desenvolvimento da Rede Cárstica (K) .	368
8.5	Álgebra de mapas e cruzamento das classificações .....	370
9.	Perigo de contaminação .....	372
10.	Análise das cargas hidráulicas.....	382
10.1	Série histórica de pluviometria .....	383
10.2	Diferenças entre as superfícies potenciométricas .....	385

10.2.1	<i>Zoneamento das diferenças Δh 1970 - 1960</i> .....	385
10.2.2	<i>Zoneamento das diferenças Δh 1980 - 1970</i> .....	387
10.2.3	<i>Zoneamento das diferenças Δh 1990 - 1980</i> .....	387
10.2.4	<i>Zoneamento das diferenças Δh 2000 - 1990</i> .....	387
10.2.5	<i>Zoneamento das diferenças Δh 2010 - 2000</i> .....	387
11.	Risco geotécnico.....	392
11.1	Metodologia.....	396
11.2	Processos de subsidência e colapso em terrenos cársticos .....	398
11.2.1	<i>Desenvolvimento do carste e os processos de dolinamentos</i> .....	398
11.2.2	<i>Tipos de dolinas x principais perigos associados</i> .....	405
11.3	O modelo conceitual do sistema aquífero de Irecê-Lapão e a carstificação .....	408
11.4	Estudos anteriores do comportamento cárstico de Lapão .....	418
11.5	O cenário atual da cidade de Lapão e os riscos do carste.....	431
11.5.1	<i>Riscos para o cenário A</i> .....	432
11.5.2	<i>Riscos para o cenário B</i> .....	434
11.5.3	<i>Riscos para o cenário C</i> .....	437
11.5.4	<i>Riscos para o cenário D</i> .....	439
11.5.5	<i>Riscos para o cenário E</i> .....	442
11.5.6	<i>Riscos para o cenário F</i> .....	444
11.6	Comentários Finais .....	446
12.	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES .....	451
13.	PROPOSTAS DE GESTÃO.....	453
14.	Referências bibliográficas .....	459

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	42
Figura 2.2: Histórico da produção de feijão na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE 2017).....	46
Figura 2.3: Atenuação das descargas a partir de 2005. ....	57
Figura 2.4: Evolução das demandas globais e da produção de água subterrânea. ....	58
Figura 2.5: Demandas para irrigação e produção dos poços. ....	59
Figura 3.1: Mapa de drenagem e corpos de água superficial da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	61
Figura 3.2: Pontos na Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. (a) Ponto aflorante perene do Riacho do Juá, nascente da Sub-bacia; (b) Trecho perene do Riacho Vereda-Cana-Brava, localizado no povoado de Olho d'água, Município de Uibaí. ....	62
Figura 3.3: Fluxos superficiais na área de estudo. (a) Riacho Vereda-cana-Brava nas Proximidades do Povoado de Olho D'água no período de chuva, segundo moradores há cerca de três anos ele passou de um regime de perene para intermitente; (b) Ponto J-101, leito Seco do Riacho do Bonito, Município de Ibititá. ....	62
Figura 3.4: Mapa de densidade de drenagem da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	64
Figura 3.5: Ponto J-044, Povoado de Conquista, município de João Dourado. ....	65
Figura 3.6: Ponto J-025, localizado no município de Uibaí. ....	67
Figura 3.7: Mapa das unidades de solo (exploratório) da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	68
Figura 3.8: Exemplos da ação antrópica na área em estudo. (a) Vista de uma Fazenda de cultivo de tomate no município de Lapão, margem direita da BA432 sentido Irecê; (b) Fazenda Circo (Poço J-056P) localizada no Povoado de Circo, Município de Ibititá, Irrigação de milho. ....	69
Figura 3.9: Mapa das classes de vegetação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	71
Figura 3.10: Declividade acentuada na encosta oriental da Serra do Uibaí. Ao fundo, a cidade de Irecê. ....	72
Figura 3.11: Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	73
Figura 3.12: A Bacia do Riacho do Juá no contexto do Platô de Irecê. Topografia do Google Earth. Geologia esquemática obtida de CPRM/CBPM (2003).....	74

Figura 3.13: Vista de dois ângulos da chapada de Irecê.....	75
Figura 3.14: Bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré. Adaptado de Silva (2005).....	76
Figura 3.15: Visão da extensão da Serra da Diamantina e o quartzito exposto no alto da serra. ....	77
Figura 3.16: Mapa geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	78
Figura 3.17: Exemplos de culturas na Bacia do Riacho do Juá: (a) Cultura familiar, comum no centro urbano dos municípios. Fazenda Boa Sorte (Poço J-001P), município de Lapão, irrigação de feijão, sorgo e milho; (b) Fazenda de irrigação de pinha, margens da BA-225, Município de Presidente Dutra; (c) Fazenda de irrigação de tomate, margens da BA-432, município de Lapão; (d) Fazenda Circo com irrigação de milho (Poço J-056P), município de Ibititá.....	80
Figura 3.18: Mapa de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	82
Figura 4.1: Mapa geológico regional da área piloto da Bacia do Riacho do Juá... ..	85
Figura 4.2: Mapa geológico da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	87
Figura 4.3: Grupo Chapada Diamantina - Formação Morro do Chapéu. Afloramento J-069, localizado no Povoado de Laranjeiras, município de Ibititá. (a) Vista geral; (b) Aberturas geradas pela interseção do acamamento com a direção de fraturamento; (c) Destaque para o S0 e S1 bem marcados, além de estratificações cruzadas e plano-paralelas; (d) As setas vermelhas mostram no topo da exposição de fraturas abertas. ....	88
Figura 4.4: Grupo Chapada Diamantina - Formação Morro do Chapéu. (a) Exposição localizada na Serra do Uibaí (Ponto J-020); (b) Destaque para o afloramento ilustrando o acamamento ainda preserva estruturas sedimentares; (c) Marcas onduladas do tipo linguóide com direção 280Az no topo da camada; (d) A seta laranja indica o paleofluxo. ....	89
Figura 4.5: (a) Vista geral do quartzito com destaque para a relação nítida entre o acamamento (setas vermelhas) e o fraturamento (setas azuis) além de feições como torres, típicas de rochas quartzíticas; (b) Detalhe ilustrando a relação entre o acamamento e falhas abertas. ....	90
Figura 4.6: Caverna presente no quartzito dentro da área de estudo. ....	90
Figura 4.7: Área de ocorrência dos grupos Una e Bambuí. Adaptado de Barbosa <i>et al.</i> (2003). ....	91
Figura 4.8: Formação Bebedouro, Ponto J-183 - Cachoeira de Boca D'água. (a) Vista da corrida de água que na época de seca tem sua vazão reduzida devido aos baixos índices pluviométricos da região; (b) Vista de um ponto na periferia da cachoeira, a cerca de 20 metros; (c) Detalhe ilustrando o arcabouço da rocha com	

orientação preferencial dos clastos; (d) Exibição de um bloco de quartzito em meio à clastos e grãos de mesma composição ilustrando a má seleção. ....	92
Figura 4.9: Fácies da Formação Salitre. Adaptado de Pedreira <i>et al</i> (1993).....	93
Figura 4.10: Unidade Nova América, Ponto J-163. Representação de uma das exposições da unidade Nova América, localizada no município de Lapão, às margens da BA-432, sentido município de Canarana. (a) Intercalação de calcisiltitos de coloração cinza com calcarenitos finos de coloração clara (b) Destaque para as superfícies crenuladas em padrão de ziguezague geradas pela dissolução das duas superfícies acima e abaixo coincidindo com os planos de acamamento.....	94
Figura 4.11: Unidade Nova América. (a) Ponto J-161; (b) Estruturas convolutas e tepees; (c) Detalhe de a para b: lamito cinza escuro ondulado intercalando com calcissiltitos cinza claro com laminação estrutura plano-paralela a homogêneo com níveis milimétricos de calcarenitos finos de coloração esbranquiçada. ....	95
Figura 4.12: Unidade Nova América, Ponto J-161. (a) Localização do afloramento nas imediações do Povoado de Conquista, município de João Dourado. (b) Detalhe mostrando a extensão do afloramento; (c) Feições de dissolução ao longo do acamamento; (d) Fotografias do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho para NNE e as falhas perpendiculares.....	96
Figura 4.13: Unidade Nova América, Ponto J-048. (a) Localização do afloramento no Povoado de Gameleira, Município de João Dourado; (b) Detalhe do afloramento J-048; (c) Fotografia do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho para NNW (linhas vermelhas tracejadas) e as falhas perpendiculares (linhas vermelhas contínuas); (d) Camadas dobradas (linhas vermelhas finas tracejadas) indicando um movimento transpressional dextral – setas roxas. ....	97
Figura 4.14: Unidade Nova América, Ponto J-165. (a) Localização do afloramento no Povoado de Bom Prazer, Município de Lapão. (b) Fotografia do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho preferencial para NW; (c) Inversão do mergulho das camadas para SE e fraturas perpendiculares à direção das camadas; (d) Dobra apertada afetando as camadas de rochas (detalhe no martelo). ....	98
Figura 4.15: Unidade Jussara e os litotipos identificados. (a) Siltito identificado no ponto J-054, porção SW da área estudada; (b) Sequência composta por siltito, argilito avermelhado e calcissiltito descrito no ponto J-016, na estrada que liga os municípios de Uibaí e Ibititá, margem direita; (c) Ponto J-095, calcarenito cinza médio contendo nódulos espapaçados, concordantes com o acamamento; (d) Ponto J-107, calcarenitos cinza escuro contendo veios de calcita e localmente, contendo níveis com pirita; (e) e (f) Ponto J-091, trombólitos. ....	100

- Figura 4.16: Unidade Jussara, Ponto J-159. (a) Localização do afloramento em Lapão; (b) Retângulo amarelo indicando o afloramento; (c) Estruturação do afloramento. Linhas tracejadas – camadas com mergulho para NW, linhas contínuas – dobra, setas roxas – sentido dos movimentos tectônicos; (d) Reconstituição da dobra em escala de afloramento.....101
- Figura 4.17: Unidade Jussara, Ponto J-086. (a) Limite do “Domo de Ibititá” (círculo amarelo tracejado) e a localização do afloramento em discussão; (b) Padrão de Falhamento NNE e ESE (setas tracejadas vermelhas); (c) e (d) Feição de dissolução denominada “tanque”. .....102
- Figura 4.18: Unidade Irecê Ponto J-166. Calcarenitos de cor cinza médio, intercalados com níveis margosos, localizados no centro urbano do município de Lapão, próximo ao cemitério municipal. (a) Extensão da área aflorante; (b) Destaque para o tipo de ocorrência espaçada devido à variação da espessura do solo, bem comum para os calcários desta unidade.....103
- Figura 4.19: Unidade Irecê, Ponto J-181. Exposição localizada próximo ao ponto anterior. ....103
- Figura 4.20: Unidade Irecê, Ponto J-160. (a). Vista geral da exposição localizada as margens da BA432, município de Lapão; (b) Sílex de coloração cinza escuro associado siltitos de coloração cinza-esverdeado; (c) Calcarenito cinza médio; (d) e (e) Final da sequência pelítica com destaque para o argilito de coloração avermelhada.....104
- Figura 4.21: Formação Caatinga conforme observada durante o levantamento de campo. a) Exposição em uma estrada vicinal que liga o município de Uibaí ao Povoado de Poço pela Avenida Central (J-154). b) Detalhe marcado na foto a) ilustrando o aspecto opaco e a coloração branca característica. ....105
- Figura 4.22: Formação Caatinga. Ponto J-007, afloramento as margens da BA432 margem esquerda no sentido Uibaí-Ibititá. Feições de dissolução com preenchimento de solo cujo recobrimento é raso.....105
- Figura 4.23: Formação Caatinga. Afloramento localizado (J-150) numa estrada vicinal que dá acesso ao Povoado Matinha de Brito no município de Presidente Dutra. A Formação Caatinga como calcrete.....106
- Figura 4.24: Vista de uma das formas de ocorrência da Formação Catinga. (a) ocorre preenchendo fraturas e acamamento na Formação Salitre como calcrete; (b) Preenchendo fraturas perpendiculares e sobrepondo parcialmente.....106
- Figura 4.25: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar no Supergrupo Espinhaço (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior). ....107
- Figura 4.26: Ponto J-008 - calcissiltitos pertencentes à Unidade Jussara. Dobras abertas a fechadas, com eixo EW horizontal e plano axial com mergulho forte para N. ....108

Figura 4.27: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar e eixos de dobra no Domínio E do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).....	109
Figura 4.28: Estereograma mostrando os polos de clivagem (xistosidade) no Domínio E do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior)..	109
Figura 4.29: Possível figura de interferência de dobramentos, tipo “caixa de ovos”, em ritmitos da Unidade Nova América (Ponto J-001). .....	110
Figura 4.30: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar no Domínio W do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).	111
Figura 4.31: Estereograma mostrando os polos de clivagem (xistosidade) no Domínio W do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).	111
Figura 4.32: Diagrama rosácea mostrando a direção de fraturas medidas no campo: A) Domínio E do Grupo Una; B) Domínio W do Grupo Una; C) Domínio do Supergrupo Espinhaço. ....	113
Figura 4.33: Mapa de lineamentos estruturais da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	114
Figura 4.34: Ponto J-048. (a) Dutos subterrâneos associados com sumidouros; (b) Setas azuis indicam as fraturas e a vermelha o acamamento; (c) Duto subterrâneo. ....	116
Figura 4.35: Duto e Caverna na região central na área de estudo (Ponto J-165). (a) Duto; (b) Caverna. ....	117
Figura 4.36: Ponto J-086. (a) Dutos superficiais alinhados com respeito ao comprimento longitudinal, com o acamamento e verticalmente com fraturas abertas; (b) Detalhe ilustrando a relação entre o acamamento (seta vermelha) e fraturas (seta azul). ....	117
Figura 4.37: Sumidouros encontrados na região de estudo. (a) Ponto J-038; (b) Ponto J-045, destaque para as setas indicando a relação entre o acamamento (seta vermelha) e fraturamento aberto (seta azul); (c) Ponto J-047. Esses três primeiros localizados no Povoado de Gameleira, município de João Dourado; (d) Ponto J-165 localizado na Fazenda Lajedo, Povoado de Bom Prazer, Município de Lapão. ....	118
Figura 4.38: Sumidouros e condutos subterrâneos identificados na Unidade Jussara, no Ponto J-114, localizada as margens da BA148, sentido Ibititá. (a) Construção identificando uma antiga ponte de onde localizava um cano de adutora para irrigação; (b) Deslocamento ao longo do terreno se dá por pontos onde persistem áreas mais seguras nos calcarenitos e ligadas por tábuas de madeira; (c) Detalhe da ponte de madeira; (d) Interligação entre os pontos de dissolução superficial; (e) Lapiás pouco desenvolvidos no topo; (e) Detalhe da profundidade e ligação entre os dutos subterrâneos.....	119

Figura 4.39: Aberturas longitudinais chamadas de “tanque” que na verdade correspondem a fendas. (a) Ponto J-001, localizado no povoado de Gameleira, município de João Dourado; (b) Ponto J-161 localizado no povoado de Conquista, município de João Dourado.....	120
Figura 4.40: Fendas na Unidade Jussara, localizados no Município de Ibititá/BA. (a) Ponto J-081; (b) e (c) J-086; (d) J-086 e (e) J-095.....	121
Figura 4.41: Feições superficiais pouco desenvolvidas. (a) Lapiás; (b) Feições arredondadas com diâmetros diferentes, tipo “bacias de dissolução”; Ponto J-165, localizado no povoado de Bom Prazer, município de Lapão/BA. ....	122
Figura 4.42: Morfologia aérea do tipo Lapiás. (a) Ponto J-079; (b) Ponto J-083. Localizados no centro urbano do município de Ibititá/BA. ....	122
Figura 4.43: Bacias de dissolução superficial identificadas no ponto J-095.....	123
Figura 4.44: Dolina localizada no centro urbano do Município de Lapão, na região centro-norte da área de estudo. (a) Vista geral da dolina conhecida localmente como Fonte do Lapão; (b) Detalhe ilustrando a profundidade, estimada em 10 metros. ....	123
Figura 4.45: Ponto J-171. (a) e (b) Microbacias de dissolução no topo dos calcissiltitos pertencentes a Unidade Irecê. ....	124
Figura 4.46: Mapa das estruturas de carstificação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	125
Figura 4.47: Subsidência de solo, ponto J-023G. (a) e (b) Abatimento do solo; (c) e (d) Abatimento associado ao aparecimento de sumidouro, mas, sem água; (e) e (f) mesmo fenômeno, mas, com água correndo e segundo informações, de regime perene. ....	127
Figura 4.48: Processo de abatimento nas proximidades do centro urbano do Distrito de Mirorós. (a) e (b) Subsidência do solo formando feições arredondadas rasas; (c) e (d) Formação de sumidouro; (e) e (f) abatimento do teto de caverna. ....	128
Figura 4.49: Visita aos pontos de ocorrência dos abatimentos na Fazenda Pé de Limão Ponto J-025G. (a) e (b) camada de solo rasa areno-argilosa de coloração amarronzada e o calcário apresenta uma cobertura residual esbranquiçada, mas, ainda é perceptível a intercalação entre as laminações; (c) e (d) Outro ponto localizado a 2 metros do anterior obedecendo às mesmas características descritas anteriormente, mas, apresenta uma cobertura de solo mais espessa. ....	129
Figura 4.50: Vista geral da área afetada, Ponto J-030G. (a) Geometria subarredondada apresentando uma variação na espessura do solo como uma rampa até a entrada do sumidouro; (b) e (c) Sumidouro; (d) Vista da área com maior espessura do solo. ....	130

Figura 4.51: Vista geral do desabamento na área rural, Ponto J-029G. (a) Solo argiloso de coloração avermelhada e bem espesso; (b) Sumidouro.....	131
Figura 4.52: Ponto J-018G, Povoado de Conquista. (a) Colapso do terreno que gerou uma cratera com aproximadamente 15 metros de profundidade; (d) Detalhe ilustrando a relação entre o solo raso sobrepondo os calcários da Formação Caatinga.....	131
Figura 4.53: Ponto J-017G, Fazenda Moreira. (a) Acamamento com mergulho para S e fraturas abertas refletindo o padrão N-S e NE-SW; (b) Sinclinal mergulhos de 54° para S e 57° para N e direção E-W do eixo axial; (c) e (d) Trincas e fendas abertas com cerca de 2 cm de abertura em média, apresentando três direções distintas conforme indicado pelas setas vermelhas; (e) Fendas e pequenos colapsos associados; (f) Abatimentos isolados alinhados na direção NNE, rasos, com profundidade aproximada de 50 cm. ....	133
Figura 5.1: Posição das estações gravimétricas na área piloto da bacia do Riacho do Juá. ....	136
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. ....	138
Figura 5.3: Mapa da Anomalia Bouguer Completa da área piloto da Bacia do Riacho do Juá (BA). ....	140
Figura 5.4: Mapa de Anomalia Bouguer Regional da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	141
Figura 5.5: Mapa de Anomalia Bouguer Residual da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	142
Figura 5.6 (A): Mapa de derivada na direção E-W. ....	143
Figura 5.6 (B): Mapa de derivada na direção N-S. ....	144
Figura 5.6 (C): Mapa de derivada na direção vertical. ....	145
Figura 5.7: Modelagens 2D e 3D da região da bacia do riacho do Juá: (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. ....	146
Figura 5.8: Substrato da Formação Salitre. ....	147
Figura 5.9: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. O desvio para as profundidades é de $\pm 100$ m. ....	149
Figura 5.10: Distribuição das SEVs na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. .	151

Figura 5.11: Tipo de SEV mais comum sobre a Formação Salitre.....	152
Figura 5.12: Condutividade das águas e condutâncias longitudinais.....	154
Figura 5.13: Coluna estratigráfica no extremo sul da Bacia de Irecê, na região de Cocho do Moleiro/Palmeiras. Modificado de Misi, A. & Souto P. (1975) in Feitosa (1975).....	155
Figura 5.14: Exemplo de SEV interpretada.....	156
Figura 5.15: Ilustração do esquema para obtenção do IC.....	157
Figura 5.16: Posição dos perfis de resistividade na área piloto do Riacho do Juá. ....	158
Figura 5.17: Perfil de resistividade A.....	158
Figura 5.18: Perfil de resistividade B.....	159
Figura 5.19: Perfil de resistividade C.....	159
Figura 5.20: Perfil de resistividade D.....	159
Figura 5.21: Perfil de IC% A.....	161
Figura 5.22: Perfil de IC% B.....	161
Figura 5.23: Perfil de IC% C.....	161
Figura 5.24: Perfil de IC% D.....	162
Figura 5.25: Zoneamento de Resistividades Aparentes.....	163
Figura 5.26: Zoneamento do IC simples. ....	164
Figura 5.27: Zoneamento do IC%. ....	165
Figura 5.28: Zoneamento do IC polinomial. ....	166
Figura 5.29: Posição da área estudada.....	168
Figura 5.30: Fazenda 7 Cascas, ponto J-008G. (a) Sumidouro presente de forma pontual e localizada ao longo das aberturas; Fendas variam de acordo com a largura. Variam entre 50 cm (c) a menos de 10 cm (d).....	171
Figura 5.31: Fazenda Juá, ponto J-002G. (a) Abatimentos alinhados na entrada da propriedade; (b) Fendas contínuas no solo com orientação N-S; (c) Rachaduras localizadas no centro da propriedade com orientação E-W; (d) Rachaduras próximas à sede da propriedade.....	172
Figura 5.32: Ponto J-006G, Povoado de Lagoa dos Patos. (a) Fissura ao longo da via que liga o centro urbano às propriedades; (b) Fissuras contínuas ao longo do terreno; (c) Colapsos pontuais associados a rachaduras; (d) Fissuras largas associadas com colapsos na direção do poço artesiano. ....	173
Figura 5.33: Posição dos perfis realizados em Lapão. Os pontos amarelos são as estações de medição ao longo dos perfis. ....	174

Figura 5.34: Mapa do índice de carstificação clássica. ....	176
Figura 5.35: Pontos de alto valor do índice de carstificação. ....	179
Figura 5.36: Mapa de dolinas. ....	184
Figura 5.37: Zoneamento de vazões da área piloto do riacho do Juá. ....	185
Figura 5.38: Localização dos poços utilizados para a realização de Perfilagem Óptica e Geofísica. ....	188
Figura 5.39: Perfilagem óptica no Poço J-031P. (a) Comportamento do bandamento verticalizado na Unidade Nova América; (b) Vista geral do Poço J-031P; (c) Vista lateral da fratura aberta destaque para fraturas preenchidas perpendiculares a direção preferencial do acamamento; (d) Micro espaços entre o bandamento. ....	190
Figura 5.40: Perfilagem óptica no Poço J-022P. (a) Vista geral do poço; (b) Micro espaços entre planos de acamamento cortados por fraturas abertas e preenchidas de pouca profundidade; (c) Fácies representando um calcário cinza escuro com ocorrência densa de fraturas e falhas preenchidas por calcita, presentes na Unidade Irecê, que se estende em todo o poço; (d) Veios preenchidos por calcita, ricos neste intervalo (113,75 metros).....	191
Figura 5.41: Perfilagem óptica no Poço J-038P. (a) Comportamento estrutural típico no calcário observado nos primeiros 15 metros durante a perfilagem; (b) Vista geral do poço numa das entradas de água; (c) Comportamento do calcário a partir do intervalo de 60 metros; (d) Fratura aberta com baixa profundidade obedecendo a direção preferencial do comportamento verticalizado do acamamento.....	192
Figura 5.42: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-031P. ....	193
Figura 5.43: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-046P. ....	194
Figura 5.44: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-038P. ....	195
Figura 6.1: Área piloto da Bacia do Riacho do Juá .....	197
Figura 6.2: Vazão/metro de profundidade x profundidade dos poços captando a Formação Salitre do Grupo Una.....	198
Figura 6.3: Histograma de profundidades dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	199
Figura 6.4: Zoneamento de vazões da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. .	200
Figura 6.5: Localização da área do teste de bombeamento na Fazenda Gameleira - município de João Dourado – BA.....	203

Figura 6.6: Perfil litológico e construtivo do poço bombeado no teste da Fazenda Gameleira município de João Dourado BA. Condutor hidráulico cárstico fissural com entradas de água a 15, 95 e 97 m de profundidade. ....	204
Figura 6.7: Cargas de pressão registradas no poço bombeado e em 3 (três) poços de observação, durante o teste de bombeamento e de recuperação realizado na Fazenda Gameleira. ....	206
Figura 6.8: Capacidade específica do poço bombeado, indicativa de regime de quase equilíbrio, como sugere a pouca variação do rebaixamento (de 3,5 a 4,0 m) durante as 72 horas de teste da Fazenda Gameleira município de João Dourado – BA. ....	207
Figura 6.9: Reservatório para onde foi canalizada a água bombeada do poço PB Marcos, situado a 38 m de distância. A seta aponta o local de descarga da d'água. Embora seja uma potencial fonte de retorno da água para o condutor hidráulico, não há evidência de que isto tenha ocorrido de forma significativa. ..	208
Figura 6.10: Interferências registradas antes do teste e rebaixamento quase estacionário durante o teste do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. .	209
Figura 6.11: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado Marcos Moreira na Fazenda Gameleira, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.....	210
Figura 6.12: Interferências registradas no poço observado PO-1, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	212
Figura 6.13: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-1, no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	213
Figura 6.14: Interferências registradas no poço observado PO-2, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	214
Figura 6.15: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-2, no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	214
Figura 6.16: Interferências registradas no poço observado PO-3, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	215
Figura 6.17: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-3 no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira. ....	215
Figura 6.18: Perfilagem gama e litologia do poço bombeado PB Gildázio (J-038P) na Fazenda Israel mostrando que o mesmo tem 98 m de profundidade, contendo 20 m de revestimento em PVC e o intervalo restante diretamente no calcário Bambuí. ....	217
Figura 6.19: Variação das cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Israel – Uibaí/BA - onde se vê que	

o poço bombeado e os observados se acham em regime dinâmico de “quase” equilíbrio.....	218
Figura 6.20: Capacidade específica de 0,5 m <sup>3</sup> /h.m do poço bombeado na Fazenda Israel para 20 m de rebaixamento superpondo uma vazão de 10 m <sup>3</sup> /h ao condutor hidráulico existente em regime dinâmico de “quase” equilíbrio.....	219
Figura 6.21: Rebaixamento e recuperação com o tempo no poço PB – Gildázio bombeado com vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /h, superposta a escoamentos anteriores. ....	220
Figura 6.22: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado Gildázio, na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.....	221
Figura 6.23: Gráfico de rebaixamento com o tempo no poço observado PO-1 – Gildázio a 929 m de distância, superposto a regime influenciado.....	223
Figura 6.24: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-1 Gildázio, na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Barenblat <i>et al</i> , 1960.....	223
Figura 6.25: Gráfico de rebaixamento com o tempo no poço observado PO-2 Leda, superposto a regime influenciado por outros poços, além do bombeado com vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /s. ....	224
Figura 6.26: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-2 Leda a 1028 m de distância na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton, 1963. ....	224
Figura 6.27: Vista geral do vale onde se localizam os 4 (quatro) poços envolvidos no teste de aquífero. Da esquerda para direita, mostra-se o Poço Bombeado PB, Poço Observado 1; Poço Observado 2 e Poço Observado 3. Ao fundo, a barragem a montante dos poços.....	226
Figura 6.28: Barragem construída no início do ano de 2014 já com bastante água acumulada no momento do teste. Ainda não “sangrou”. Esta barragem fica 139 m a montante dos poços mostrados na Figura 6.29. ....	226
Figura 6.29: Perfil litológico e construtivo do poço da Fazenda Jatobá CPRM SIAGAS 2900005021 em condutor hidráulico do SAB com entradas de água a 33,0, 44,0 e 53,0 m de profundidade.....	227
Figura 6.30: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Jatobá – município de Uibaí/BA. ...	228
Figura 6.31: Capacidade específica do poço bombeado no teste da Fazenda Jatobá, município de Uibaí/BA com vazão constante de 19,5 m <sup>3</sup> /h. ....	229

Figura 6.32: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado na Fazenda Jatobá, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963. ....	230
Figura 6.33: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-3 a 99 m de distância na Fazenda Jatobá, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.....	231
Figura 6.34: Reservatório muito próximo (em torno de 25 m), do Poço PB HUGO no qual foi lançada a descarga da água do teste para armazenamento e distribuição por meio de microaspersores em campo de lavoura a 250 m de distância, na Fazenda Morro Pelado I.....	232
Figura 6.35: Perfil litológico do poço SIAGAS 29000025187 e CERB 3-1365/76 perfurado na Fazenda Morro Pelado, município de Lapão/BA.....	234
Figura 6.36: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Morro do Pelado I.....	235
Figura 6.37: Capacidade específica do poço bombeado no teste da Fazenda Morro do Pelado I para o RMP.....	236
Figura 6.38: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado PB Hugo, na Fazenda Morro Pelado I, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963. Notar que após os 10 minutos de bombeamento a curva se desvia para baixo indicando uma diminuição do rebaixamento provavelmente por influência de recarga induzida do reservatório mostrado na figura 6.37. ....	237
Figura 6.39: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO Hugo a (195 m de distância) na Fazenda Morro Pelado, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963. ....	238
Figura 6.40: Perfil litológico e construtivo do poço. ....	240
Figura 6.41: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.....	241
Figura 6.42: Capacidade específica de 0,14 m <sup>3</sup> /h.m para o RMP no poço bombeado no teste da Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA. ....	241
Figura 6.43: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado PB João na Fazenda Serrolândia, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.....	242
Figura 6.44: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-1 a 122 m de distância, em regime influenciado na Fazenda Serrolândia usando o modelo de Barenblat <i>et al</i> 1960.....	243

Figura 6.45: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-2 Lourival, em regime influenciado na Fazenda Serrolândia usando o modelo de Barenblat <i>et al</i> 1960. ....	245
Figura 6.46: Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO-3 Wecsley na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra/BA. ....	246
Figura 6.47: Mapa de localização da Área Piloto Riacho do Juá no contexto geológico regional e bacia de contribuição delimitada a partir da estação Rio Verde II.....	250
Figura 6.48: Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica do município de Irecê (período 1961-1990), Embrapa (2003).....	252
Figura 6.49: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da Área Piloto Riacho do Juá e bacia de contribuição da estação fluviométrica Rio Verde II. ....	253
Figura 6.50: Hidrograma e suas regiões principais. Adaptado de: Aksoy <i>et al</i> 2014. ....	255
Figura 6.51: Valor de $-1k$ (retângulo vermelho) a partir da curva exponencial referente ao período de recessão. ....	256
Figura 6.52: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Rio Verde II (Código ANA 47249000) e pluviosidade da estação Pluviométrica Rio Verde II CODEVASP (Código ANA 1042012), no ano hidrológico 2002-2003. ....	260
Figura 6.53: Frequências das classes de profundidade dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.....	269
Figura 6.54: Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.....	270
Figura 6.55: Frequências das classes de profundidade dos níveis estáticos dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	271
Figura 6.56: Frequências das classes dos níveis dinâmicos dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	272
Figura 6.57: Frequências das classes de vazão dos poços cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	273
Figura 6.58: Distribuição espacial da vazão dos 403 poços produtores na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	277
Figura 6.59: Zoneamento da exploração do aquífero Bambuí na área piloto do Riacho do Juá mostrando a maioria das células com déficit hídrico significativo. ....	281
Figura 7.1: Localização dos poços amostrados na Bacia do Riacho do Juá.....	284

Figura 7.2 - Sonda e eletrodos para determinação da temperatura, pH e ORP..	285
Figura 7.3 - Leitura dos parâmetros condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos.....	286
Figura 7.4 - Inserção do eletrodo para leitura dos parâmetros <i>in situ</i> . ....	286
Figura 7.5 – Caixa térmica com gelo para acondicionamento e envio das amostras para o laboratório. ....	287
Figura 7.6: 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. ....	291
Figura 7.7: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	292
Figura 7.8: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do bicarbonato (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	292
Figura 7.9: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do ferro (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	293
Figura 7.10: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	295
Figura 7.11: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	295
Figura 7.12: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de bicarbonato (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	296
Figura 7.13: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do ferro (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil. ....	297
Figura 7.14: Comparação dos resultados de CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na Bacia do Riacho do Juá. ....	298
Figura 7.15: Comparação dos resultados de STD (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1º campanha) e úmido (2º campanha) na bacia do Riacho do Juá. ....	298

Figura 7.16: Comparação dos resultados de dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	299
Figura 7.17: Comparação dos resultados de bicarbonato (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	299
Figura 7.18: Comparação dos resultados de magnésio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	300
Figura 7.19: Comparação dos resultados de sódio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá. ....	300
Figura 7.20: Comparação dos resultados de potássio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	301
Figura 7.21: Comparação dos resultados de pH obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá. ....	301
Figura 7.22: Comparação dos resultados de fluoreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	302
Figura 7.23: Comparação dos resultados de sulfato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá. ....	302
Figura 7.24: Comparação dos resultados de cloreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá. ....	303
Figura 7.25: Comparação dos resultados de nitrato (mg/L N) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.....	303
Figura 7.26: Comparação dos resultados de cálcio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Riacho do Juá. ....	304
Figura 7.27: Resultados de CE (µS/cm) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	307
Figura 7.28: Resultados de STD (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	308

Figura 7.29: Distribuição dos resultados de STD (mg/L) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	309
Figura 7.30: Distribuição dos resultados de STD (mg/L) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido. ....	310
Figura 7.31: Resultados de pH nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	311
Figura 7.32: Distribuição dos resultados de pH no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	312
Figura 7.33: Distribuição dos resultados de pH no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.....	313
Figura 7.34: Resultados de bicarbonato (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais. ....	314
Figura 7.35: Resultados de cloreto (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	315
Figura 7.36: Distribuição dos resultados de cloreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	316
Figura 7.37: Distribuição dos resultados de cloreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.....	317
Figura 7.38: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da Área Piloto Riacho do Juá e bacia de contribuição da estação fluviométrica Rio Verde II. ....	318
Figura 7.39: Resultados de sulfato (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	319
Figura 7.40: Distribuição dos resultados de sulfato (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	320
Figura 7.41: Distribuição dos resultados de sulfato (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.....	321
Figura 7.42: Resultados de cálcio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	323
Figura 7.43: Resultados de magnésio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	323
Figura 7.44: Resultados de sódio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	324
Figura 7.45: Resultados de potássio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	324
Figura 7.46: Resultados de ferro (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.....	325

Figura 7.47: Resultados de Dureza (mg/L CaCO <sup>3</sup> ) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais. ....	326
Figura 7.48: Distribuição dos resultados de dureza (mg/L CaCO <sup>3</sup> ) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	327
Figura 7.49: Distribuição dos resultados de dureza (mg/L CaCO <sup>3</sup> ) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido. ....	328
Figura 7.50: Correlação entre a dureza e cálcio, no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados. ....	329
Figura 7.51: Correlação entre a dureza e magnésio no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados. ....	329
Figura 7.52: Correlação entre a dureza e cloreto no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados. ....	330
Figura 7.53: Correlação entre a dureza e sódio no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados. ....	330
Figura 7.54: Correlação entre a dureza e sulfato no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados. ....	331
Figura 7.55: Resultados de fluoreto (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais. ....	332
Figura 7.56: Distribuição dos resultados de fluoreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	333
Figura 7.57: Distribuição dos resultados de fluoreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido. ....	334
Figura 7.58: Resultados de nitrato (mg/L N) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais. ....	336
Figura 7.59: Distribuição dos resultados de nitrato (mg/L - N) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco. ....	337
Figura 7.60: Distribuição dos resultados de nitrato (mg/L - N) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido. ....	338
Figura 7.61: Correlação entre a nitrato e condutividade elétrica no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados. ....	339
Figura 7.62: Correlação entre nitrato e STD no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados. ....	339
Figura 7.63: Correlação entre nitrato e cálcio no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados. ....	340
Figura 7.64: Correlação entre nitrato e cloreto no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados. ....	340

Figura 7.65: Diagrama de Piper das amostras coletadas na Bacia do Riacho do Juá no período seco.....	342
Figura 7.66: Diagrama de Piper das amostras coletadas na Bacia do Riacho do Juá no período úmido.....	343
Figura 7.67: Distribuição dos diagramas de Stiff no período seco. ....	344
Figura 7.68: Distribuição dos diagramas de Stiff no período úmido. ....	345
Figura 7.69: Distribuição das fácies hidroquímicas no período seco.....	347
Figura 7.70: Distribuição das fácies hidroquímicas no período úmido. ....	348
Figura 7.71: Parâmetros STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP. ....	353
Figura 7.72: Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	354
Figura 7.73: Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	354
Figura 7.74: Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	355
Figura 7.75: Resultados analíticos para o parâmetro fluoreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	355
Figura 7.76: Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	356
Figura 7.77: Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.....	356
Figura 7.78: Relação de $\delta^{18}O$ e $\delta D$ das amostras. Linha tracejada corresponde a Reta Meteorica Mundial (RMM). Equação da reta: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ . ....	358

Figura 8.1: Parâmetro E: Epicarste. ....	363
Figura 8.2: Distribuição areal das classes do parâmetro P: cobertura de proteção. ....	365
Figura 8.3: Distribuição areal das classes do parâmetro I: condições de infiltração. ....	367
Figura 8.4: Distribuição areal das classes do parâmetro K: grau de desenvolvimento da rede cárstica. ....	369
Figura 8.5: Classificação da vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	370
Figura 8.6: Mapa de Vulnerabilidade – EPIK Adaptado para a área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	371
Figura 9.1: Sumidouro localizado no Povoado de Aguada Nova, município de Lapão: Destaque para o lixo que é descartado no local. ....	373
Figura 9.2: Distribuição das cargas contaminantes na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	374
Figura 9.3: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	375
Figura 9.4: Sumidouro localizado na Rua José Vitor Carvalho. (a) Vista da área construída ao redor do sumidouro; (b) Manilha onde a água pluvial é escoada dos arredores até o local. ....	376
Figura 9.5: Lixões na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. (a) JC-017P (Lixão Municipal, Ibititá), localizado km-35 da BA-148; (b), (c) e (d) Outras vistas do lixão, próximo a uma fazenda de irrigação; (e) e (f) JC-002P (Lixão Municipal de Lapão), localizado na margem esquerda da BA-432. ....	377
Figura 9.6: Cemitérios na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. (a) Ponto JC-007P - Cemitério Colina da Saudade, localizado no município de Lapão; (b) Visão da parte central da área do Cemitério; (c). Ponto JC-030P - Cemitério Senhor do Bonfim (localizado na periferia do município de Ibititá, km 31 da margem direita da BA-148); (d) Cemitério pertencente ao Povoado de Poço, município de Uibaí; (e) e (f) Antigo Cemitério Municipal de Uibaí, localizado no centro urbano. ....	379
Figura 9.7: Estação de tratamento de esgoto do município de Lapão. (a) Composta por três piscinas sendo que, apenas uma não apresentava material; (b) Piscina contendo o material que é recolhido das casas e despejado no local. ...	380
Figura 9.8: Postos de combustíveis na Bacia do Riacho do Juá. (a), (b) e (c) - Ponto JC-031P (Auto Posto Bodão, Município de Lapão). Construção do Posto de gasolina cuja estrutura é bem comum em todos os empreendimentos deste tipo, presente na área de estudo. A fase de locação dos tanques de combustível no solo até sua finalização; (d) Ponto JC-021P (Mega Posto Avenida, localizado no	

município de Uibaí). Exemplo da estrutura dos Postos de gasolina mais antigos encontrado na área Piloto. ....	381
Figura 10.1: Superfícies potenciométricas e abordagem adotada. Modificado de Feitosa & Filho (2008). ....	382
Figura 10.2: Série histórica de chuvas anuais na estação 83182/INMET em Irecê (Fonte: INMET) e posto 1141007/Hidroweb).....	383
Figura 10.3: Série histórica de chuvas anuais na estação 83236/INMET em Barreiras (Fonte: INMET). ....	384
Figura 10.4: Série histórica de chuvas anuais na estação 83437/INMET em Montes Claros (Fonte: INMET e posto 1643018/Hidroweb).....	384
Figura 10.5: Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1970 – 1960 (década de 1970).....	386
Figura 10.6: Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1980 – 1970.....	388
Figura 10.7: Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1990 – 1980.....	389
Figura 10.8: Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 2000 – 1990.....	390
Figura 10.9: Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 2010 – 2000.....	391
Figura 11.1: Feições cársticas mapeadas em Lapão. ....	395
Figura 11.2: Principais tipos de dolinas: dolinas de dissolução, dolinas de colapso (dolina de colapso em solo, dolina de abatimento devido à carste subjacente) e dolinas de subsidência lenta (dolina em sumidouro aluvial).....	401
Fonte: modificado de Waltham <i>et al</i> (2005).....	401
Figura 11.3: Processos de recarga no contexto do Aquífero Cárstico Salitre. ....	411
Figura 11.4: Visualização de dolinas no município de Lapão.....	414
Figura 11.5: Posicionamento das áreas de risco na área urbana e periurbana de Lapão: em vermelho, eletrorresistividade + gravimetria e em preto, gravimetria. Fonte: Santos <i>et al</i> (2009).....	420
Figura 11.6: Riscos associados ao carste exposto, onde existe um sistema de condutos conectados a cavidades muito próximos a superfície – Cenário A. ....	433
Figura 11.7: Riscos associados ao carste exposto, onde as camadas estão inclinadas e dobradas, existindo falhas e fraturas onde houve o desenvolvimento de um sistema de condutos e cavernas conectados a superfície – Cenário B....	436
Figura 11.8: Riscos associados ao calcário exposto pouco carstificado – Cenário C.....	438
Figura 11.9: Riscos associados ao carste coberto, onde existe um sistema de condutos conectados ao solo e as cavidades, posicionados próximos a superfície e nível de água na base do solo – Cenário D.....	440

Figura 11.10: Problemas construtivos de poços que aumentam os riscos de aparecimento de trincas, fendas e dolinas no solo. Fonte: Waltham <i>et al</i> , 2005.	441
Figura 11.11: Riscos associados ao carste coberto, existindo no maciço rochoso falhas e fraturas onde houve o desenvolvimento de um sistema de condutos e cavernas conectados a superfície. Existe ainda um sumidouro soterrado com um conduto parcialmente obstruído – Cenário E. ....	443
Figura 11.12: Riscos associados a calcários cobertos pouco carstificados – Cenário F.....	445
Figura 11.13: Áreas de risco em Lapão. ....	448
Figura 13.1: Áreas de maior risco e áreas de baixo risco em Lapão.....	455
Figura 13.2 – Rede de monitoramento proposta para a Bacia do Riacho do Juá. ....	458

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - População, rendimento, alfabetização e IDHM dos municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.....	43
Tabela 2.2 - Faixas de Desenvolvimento Humano – IDHM.....	45
Tabela 2.3 - PIB e PIB per capita dos municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE 2012).....	45
Tabela 2.4 - Produção de raízes da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá em relação ao estado da Bahia (IBGE, 2017). ....	46
Tabela 2.5 - Produção agrícola da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE, 2017).....	47
Tabela 2.6 - PIB primário, secundário, terciário e total dos municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá, em R\$ mil (Fonte).....	47
Tabela 2.7 - Fontes de abastecimento de água para os municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	49
Tabela 2.8 - Formas de esgotamento sanitário para os municípios na área piloto do Riacho do Juá. ....	50
Tabela 2.9 - Incidência de doenças associadas à falta de saneamento básico nos municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.....	51
Tabela 2.10 - Destino do lixo para os municípios na área piloto do Riacho do Juá. .	51
Tabela 2.11 - Fornecimento de Energia Elétrica para os municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	52
Tabela 2.12 – Demanda Hídrica da área piloto do riacho do Juá (m <sup>3</sup> /dia). ....	54
Tabela 2.13 – Modelo de planilha para análise da evolução temporal das descargas de água subterrânea. ....	56
Tabela 2.14 – Descargas de água subterrânea corrigidas.....	58
Tabela 2.15 – Demandas e respectivos atendimentos.....	59
Tabela 3.1 – Classificação da densidade de drenagem. Fonte: Silva <i>et al</i> (2009)....	63
Tabela 3.2 – Área, porcentagem e tipos das unidades de solo da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	67
Tabela 3.3 – Área e porcentagem da vegetação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. ....	69
Tabela 3.4 – Classificação de Declividades a partir do relevo. Fonte: Embrapa (1979).....	72
Tabela 3.5: Principais cultivos nas cidades da área piloto da Bacia do Riacho do Juá (Cardoso <i>et al</i> , 2015).....	79

Tabela 5.1 – Coordenadas das estações gravimétricas.....	135
Tabela 5.2 – Relação das SEVs na área piloto do Riacho do Juá. ....	151
Tabela 5.3 - Zonas de alta variabilidade elétrica em Lapão. ....	177
Tabela 5.4 – Pontos de alta variabilidade elétrica em Lapão (Datum coordenadas: WGS84).....	178
Tabela 5.5 - Identificação dos métodos geofísicos aplicados. ....	186
Tabela 5.6 - Poços utilizados. ....	187
Tabela 6.1 – Matriz distâncias entre poços bombeados e observados no teste do poço PB Marcos Moreira na Fazenda Gameleira.....	202
Tabela 6.2 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado para vazão constante (D=1) de 8 m <sup>3</sup> /h na Fazenda Gameleira, João Dourado - BA. ....	209
Tabela 6.3 – Parâmetros hidrodinâmicos no teste do poço bombeado Marcos Moreira na Fazenda Gameleira, município de João Dourado – BA. ....	210
Tabela 6.4 – Parâmetros da função de Boulton: poço observado PO-1. ....	210
Tabela 6.5 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-1. ....	210
Tabela 6.6 – Parâmetros da função de Boulton no poço observado PO-2. ....	211
Tabela 6.7 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-2. ....	211
Tabela 6.8 – Parâmetros da função de Boulton no poço observado PO-3. ....	211
Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-3. ....	211
Tabela 6.10 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado PB Gildázio para vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /h na Fazenda Israel município de Uibaí/BA. ....	219
Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado Gildázio na Fazenda Israel, município de Uibaí/BA. ....	220
Tabela 6.12 – Parâmetros da função de Barenblat <i>et al</i> 1960 obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO -1 Gildázio na Fazenda Israel município de Uibaí - BA. ....	221
Tabela 6.13 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO-1 Gildázio a 929 m de distância na Fazenda Israel, município de Uibaí – BA. ....	221
Tabela 6.14 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO Leda para vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /h na Fazenda Israel município de Uibaí/BA. ....	222
Tabela 6.15 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO Leda a 1028 m de distância na Fazenda Israel, município de Uibaí – BA. ....	222

Tabela 6.16 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante (dimensão D=1) de 19,5 m <sup>3</sup> /h na Fazenda Jatobá, município de Uibaí - BA. ....	230
Tabela 6.17 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Jatobá, município de Uibaí – BA. ....	230
Tabela 6.18 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-3 na Fazenda Jatobá, município de Uibaí - BA. ....	231
Tabela 6.19 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço de observação PO-3 na Fazenda Jatobá, município de Uibaí – BA. ....	231
Tabela 6.20 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /h (dimensão D=1) na Fazenda Morro Pelado I município de Lapão - BA. ....	236
Tabela 6.21 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA. ....	237
Tabela 6.22 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante de 10 m <sup>3</sup> /h (dimensão D=1) na Fazenda Morro Pelado I município de Lapão/BA. ....	238
Tabela 6.23 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA. ....	238
Tabela 6.24 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado na Fazenda Serrolândia com vazão constante de 4,5 m <sup>3</sup> /h (D=1). ....	242
Tabela 6.25 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA. ....	243
Tabela 6.26 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-1 observado na Fazenda Serrolândia município de Presidente Dutra - BA. ....	243
Tabela 6.27 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA. ....	244
Tabela 6.28 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO-2 Lourival na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra/BA. ....	244
Tabela 6.29 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço observado PO-2 Lourival na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA. ....	245
Tabela 6.30 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-1 observado na Fazenda Serrolândia município de Presidente Dutra - BA. ....	246

Tabela 6.31 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO-3 Wesley na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA. ....	247
Tabela 6.32 – Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Bambuí (SAB) obtidos em 5 (cinco) testes de bombeamento realizados em condutores hidráulicos na área de Irecê-BA. ....	248
Tabela 6.33 – Informações básicas sobre a estação fluviométrica utilizada no cálculo de recarga da Área Piloto de Riacho do Juá. ....	251
Tabela 6.34 – Percentuais de distribuição das litologias na bacia hidrográfica delimitada a partir da estação Rio Verde II. ....	258
Tabela 6.35 – Valores de Descarga Total Média Anual (Estação Rio Verde II). ....	261
Tabela 6.36 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Rio Verde II ( $R_e$ = recarga específica média; $R$ = recarga média; $N_{ef}$ = porosidade efetiva equivalente). ....	262
Tabela 6.37 – Resultados de recarga encontrados para a área piloto da Bacia do Riacho do Juá ( $R_e$ = recarga específica média; $R$ = recarga média; $N_{ef}$ = porosidade efetiva equivalente). ....	263
Tabela 6.38 – Proporções entre as áreas de ocorrência da área piloto do Riacho do Juá e a bacia do Rio Verde II. ....	264
Tabela 6.39 – Reservas e recursos hídricos subterrâneos na área piloto do riacho do Juá. ....	267
Tabela 6.40 - Parâmetros estatísticos dos dados de poços da área piloto do Riacho do Juá. ....	268
Tabela 6.41 – Frequência da profundidade dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e dos novos cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	269
Tabela 6.42 – Frequência dos diâmetros da Boca dos poços tubulares levantados no SIAGAS/CPRM, na CERB e dos novos cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	270
Tabela 6.43 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	271
Tabela 6.44 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis dinâmicos dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	272
Tabela 6.45 – Distribuição de frequência da vazão dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	273
Tabela 6.46 – Situação operacional dos 431 poços catalogados e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	273

Tabela 6.47 – Estimativa do regime médio de funcionamento dos poços da área piloto da Bacia do Riacho do Juá, usando 69 poços do cadastro de água subterrânea realizado no âmbito do projeto. ....	274
Tabela 6.48 - Produção global estimada, explotada na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. ....	276
Tabela 6.49 – Balanço entre a recarga e as retiradas de água através de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.....	279
Tabela 6.50 – Balanço entre a reserva explotável (RE) e a produção de água de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, no ano de 2014. ....	280
Tabela 6.50 – Balanço entre a reserva explotável (RE) e a produção de água de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, no ano de 2014 – Continuação. ....	280
Tabela 7.1 – Pontos coletados na bacia do Riacho do Juá e respectivos parâmetros analisados. ....	283
Tabela 7.2 - Parâmetros obtidos in situ e equipamento utilizado. ....	285
Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. (APHA, 2005).....	287
Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. (APHA, 2005) – Continuação.....	288
Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. (APHA, 2005) – Continuação.....	289
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 Riacho do Juá, no período seco.....	290
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 Riacho do Juá, no período úmido. ....	294
Tabelas 7.6 – Sumário estatístico das águas do aquífero Salitre coletadas no período seco (n=13) na Bacia do Riacho do Juá. ....	306
Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Salitre coletadas no período úmido (n=13) na Bacia do Riacho do Juá. ....	306
Tabela 7.8 - Classificação das águas segundo a dureza em mg/L (CaCO <sub>3</sub> ) (Custódio & Llamas, 1983). ....	326
Tabela 7.9 – Classificação das águas avaliadas na Bacia do Riacho do Juá. ....	346
Tabela 7.10 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) avaliados na bacia do Riacho do Juá. ....	349

Tabela 7.11 – Pontos de coleta para agroquímicos na bacia do Riacho do Juá. Em todos os poços avaliados os resultados analíticos foram inferiores ao LD. ....	350
Tabela 7.12 – Pontos de coleta para derivados de petróleo na bacia do Riacho do Juá. Em todos os poços avaliados os resultados analíticos foram inferiores ao LD. ....	351
Tabela 7.13 - 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. ....	352
Tabela 7.14 - 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. ....	353
Tabela 7.15 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano. ....	357
Tabela 7.16 – Resultados das análises de isótopos em água na bacia do Riacho do Juá. ....	358
Tabela 9.1 - Classificação do perigo à contaminação. ....	372
Na Figura 9.2 pode-se observar que as fontes contaminantes estão espalhadas pelos centros urbanos da área piloto. Existe, com efeito, um grande número de postos de combustível e esgotamento sanitário, que são de elevado potencial de contaminação, além de cemitérios, de moderada carga contaminante. ....	372
Tabela 11.1 - Principais processos pelos quais os dolinamentos são induzidos por atividades de engenharia. Fonte: Waltham <i>et al</i> (2005). ....	405
Tabela 11.2: Síntese dos estudos apresentados na literatura sobre os fenômenos cársticos no município de Lapão. ....	430
Tabela 11.3 – Coordenadas dos cantos das áreas seguras (Datum: WGS84). ....	447
Tabela 13.1 – Coordenadas dos cantos das áreas de baixo risco (Datum: WGS84) ....	454
Tabela 13.2 – Coordenadas dos poços de monitoramento da rede da Bacia do Riacho do Juá. ....	456

## 1. Introdução

O presente relatório constitui o Volume III Tomo 3 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 riacho do Juá na região de Irecê, no estado da Bahia.

A bacia hidrográfica do Juá abrange as cidades de Lapão e Ibititá, foi selecionada como área piloto devido à intensa exploração de águas subterrâneas que vem ocorrendo para atender tanto o abastecimento humano da região como a crescente demanda da agricultura irrigada decorrente do desenvolvimento econômico da região. Além disso, também contribuíram a escolha dessa área os abatimentos de terreno em Lapão, que se tornaram ostensivos desde 2008.

No Capítulo 2 é apresentada uma análise dos aspectos socioeconômicos da área que serviram de base à avaliação das demandas globais de água dessa área. Essas demandas são apresentadas a cada cinco anos, entre 2000 e 2030, e confrontadas com a evolução histórica da produção de água subterrânea.

O Capítulo 3 mostra uma caracterização física da área, onde são abordados aspectos da drenagem, solos, vegetação, geomorfologia e geologia. Na parte de geologia apresenta-se a geologia regional em cujo contexto se situa a área piloto em estudo. É abordada a geologia da área piloto (escala 1/50.000), com ênfase no mapeamento realizado no âmbito deste estudo e nas feições estruturais, faciológicas e cársticas que caracterizam a Formação Salitre.

No capítulo 4 apresenta-se os estudos geofísicos, realizados através do método gravimétrico e da resistividade. Inclui-se também uma análise dos resultados obtidos com as perfilações de poço. No que diz respeito à eletrorresistividade destaca-se o enfoque regional da área piloto e um estudo de detalhe da área urbana e periurbana de Lapão, com vista à avaliação do risco geotécnico.

No Capítulo 5 são abordados os aspectos hidrogeológicos da área piloto. Procura-se, aqui, caracterizar geometricamente o aquífero cárstico desenvolvido na Formação Salitre, definir seus parâmetros e avaliar suas reservas. Destaca-se uma avaliação da recarga, feita a partir da análise de hidrogramas registrados na estação Rio Verde II, situada na saída da bacia hidrográfica do rio Verde.

O Capítulo 6 é dedicado à hidroquímica da área piloto, onde são descritas as duas amostragens realizadas, no final do período seco e no final do período de chuvas e são caracterizadas as fácies hidroquímicas. São também avaliadas suas propriedades para consumo humano.

Os capítulos 7 e 8 lidam, respectivamente, com vulnerabilidade e com perigo de contaminação. O Capítulo 9 é dedicado à análise da evolução decenal das cargas hidráulicas da área piloto, obtidas dos poços Siagas. Essa análise evidencia as variações do armazenamento de água subterrânea com o regime de chuvas.

No Capítulo 10 apresenta-se uma discussão dos riscos geotécnicos da área urbana da cidade de Lapão e de seus arredores. É focado o problema dos colapsos de terreno que vêm danificando propriedades a partir principalmente de 2008. No Capítulo 11, finalmente, procura-se apresentar um resumo conciso, objetivo e abrangente dos principais resultados alcançados com o estudo.

## **2. Localização e aspectos socioeconômicos**

Essa área piloto é constituída pela bacia hidrográfica do Riacho do Juá, inserida na bacia hidrográfica do Rio Verde, localizada na região centro-norte do estado da Bahia, com uma área de aproximadamente 966 km<sup>2</sup>. Abrange parte dos municípios de Lapão, Uibaí, Ibititá, Irecê, Ibipeba, Presidente Dutra, João Dourado e América Dourada (Figura 2.1).

### **2.1 Análise dos dados socioeconômicos**

O panorama socioeconômico da área piloto em questão será esboçado através da análise do PIB, da taxa de alfabetização e do IDHM dos municípios nela inclusos, utilizando-se dados do ano de 2010 obtidos do SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática, na página virtual do Ministério da Saúde, e do Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil.

#### **2.1.1 Metodologia de análise**

Visando à caracterização socioeconômica da área piloto do riacho do Juá, foram levantados dados dos municípios inclusos na área. Esses dados dizem respeito a 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.

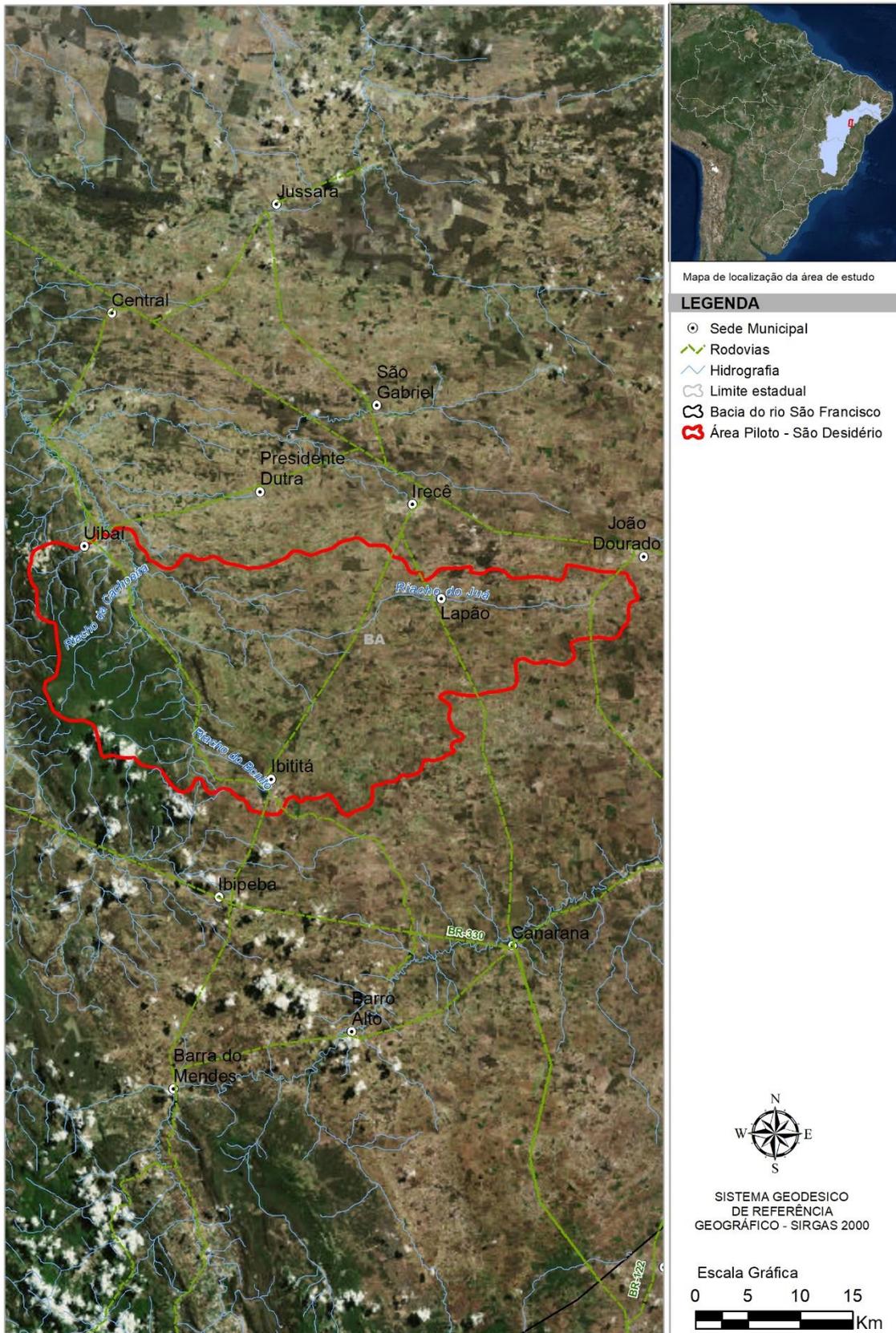
Foram também obtidas e analisadas informações a respeito da incidência de doenças de veiculação hídrica na região, visando a relacionar a recorrência de tais doenças à carência de infraestruturas de saneamento. Essas informações foram obtidas da página virtual do Ministério da Saúde, sendo as mais recentes 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 da área piloto do riacho do Juá, 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 Riacho do Juá**

Para a caracterização do grau de desenvolvimento dos municípios, buscaram-se dados relativos ao IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal. Este índice representa uma medida composta por três dimensões do

desenvolvimento humano: longevidade, educação e renda, variando de 0 a 1. Com este objetivo, foi utilizado como base o Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil, uma plataforma de consulta ao Índice de Desenvolvimento Humano Municipal – IDHM.



**Figura 2.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

### 2.1.2.1 Análise do IDHM

As três importantes variáveis que condicionam o IDHM serão abordadas: longevidade, renda e educação (Tabela 2.1). Esse índice varia no intervalo de 0 a 1, de forma que, quanto mais próximo a 1 maior o desenvolvimento da região. Será considerado, na avaliação do IDHM, o rendimento nominal médio mensal das pessoas de 10 anos ou mais de idade. Para a taxa de alfabetização, será considerada 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 dos municípios em estudo.

A Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá tem como atividades essenciais a produção agrícola e o comércio, principalmente na cidade de Irecê, que nomeia a microrregião devido à sua localização estratégica. Neste cenário, é compreensível que, quando analisada a situação socioeconômica dos municípios englobados na área sob estudo, sejam obtidos melhores índices para o município de Irecê.

**Tabela 2.1 - População, rendimento, alfabetização e IDHM dos municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Município	UF	População	Rendimento (R\$)	Alfabetização (%)	IDHM
América Dourada	BA	15.961	393,39	75,0	0,561
Ibipeba	BA	17.008	457,84	83,2	0,616
Ibititá	BA	17.840	437,32	79,1	0,602
Irecê	BA	66.181	763,84	87,7	0,691
João Dourado	BA	22.549	481,9	81,5	0,593
Lapão	BA	25.646	444,55	80,6	0,596
Presidente Dutra	BA	13.750	469,05	85,9	0,614
Uibaí	BA	13.625	455,65	84,8	0,617
<b>Bahia</b>		<b>14.016.906</b>	<b>813,94</b>	<b>84,60</b>	<b>0,660</b>

Observa-se, na Tabela 2.1, que o rendimento nominal médio dos municípios é sempre inferior ao valor do estado da Bahia como um todo. O rendimento de Irecê é o que mais se aproxima do valor estadual, sendo o único acima do salário mínimo da época (R\$ 510,00 em 2010). A região em estudo detém apenas 0,94% do rendimento total do estado, com 0,44% concentrado na cidade de Irecê, apontando a disparidade econômica existente na área piloto.

Desde que o município de Irecê contribui à área piloto apenas com uma pequena extensão, entende-se porque esta área, como um todo, apresenta um rendimento médio reduzido e inferior a media estadual.

Valores baixos de rendimento geralmente caracterizam regiões com déficit educacional. É fato 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. Este comportamento se verifica na área de estudo onde a baixos índices de alfabetização coincidem com baixos rendimentos. Excetuam-se, aqui, os municípios de Presidente Dutra e Uibaí, com índices de alfabetização acima dos estaduais. Esses municípios, apesar de possuírem a 2ª e 3ª maior taxa de alfabetização da área piloto, detêm apenas os 3º e 5º maiores rendimentos, respectivamente. Esse comportamento particular pode significar que grande parte de sua população seja composta por idosos e jovens que não contribuem à produção. Isto pode ser também um indicador de concentração de renda, visto que o rendimento nominal é obtido a partir da divisão igualitária dos rendimentos recebidos pela população.

Nesse sentido, a fim de que esse comportamento atípico de baixo rendimento e moderado índice de alfabetização seja contornado, é interessante a elaboração de um plano de estratégias para a região, visando dar dinamicidade ao mercado de trabalho local para absorção de jovens com formação média superior ao restante da área.

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. Dessa forma, poderia ser reduzida a defasagem quanto ao rendimento dos outros integrantes da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho de Juá perante Irecê, especialmente entre aqueles que apresentam melhores taxas de alfabetização – solucionando o aparente contrassenso entre os índices.

Irecê destaca-se também quanto ao IDHM, acima do da Bahia. Ibititá, Lapão e Uibaí, municípios mais relevantes depois de Irecê, têm IDHM médio de 0,603, abaixo do IDHM estadual.

De acordo com o Atlas do Desenvolvimento Humano, as faixas de desenvolvimento municipal são classificadas em Muito baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto (Tabela 2.2). Verifica-se, nessa tabela, que o IDHM médio da área piloto da Bacia do Riacho do Juá (0,630) aponta para Médio Desenvolvimento Humano, análogo ao IDH da Bahia (0,660).

**Tabela 2.2 - Faixas de Desenvolvimento Humano – IDHM.**

<b>Faixas</b>	<b>IDHM</b>
<b>0 - 0,499</b>	Muito baixo desenvolvimento humano
<b>0,500 - 0,599</b>	Baixo desenvolvimento humano
<b>0,600 - 0,699</b>	Médio desenvolvimento humano
<b>0,700 - 0,799</b>	Alto desenvolvimento humano
<b>0,800 - 1</b>	Muito alto desenvolvimento humano

### 2.1.2.2 Análise do PIB

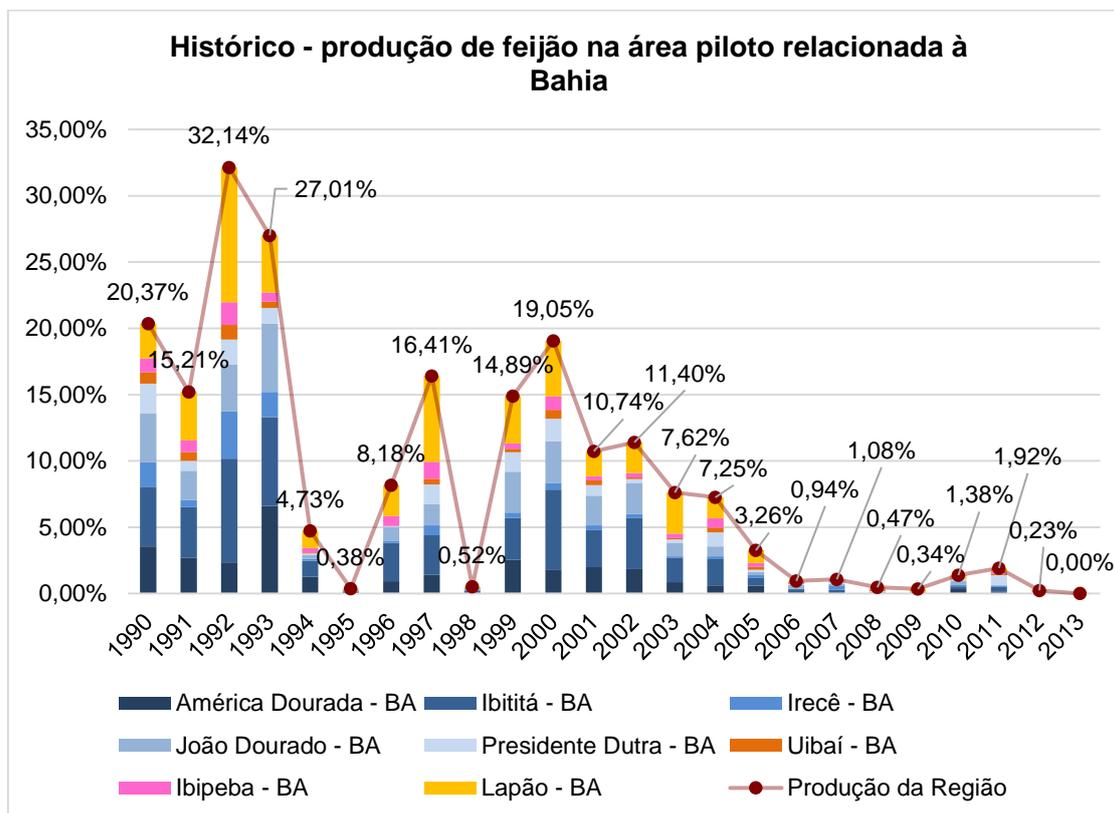
Os dados sobre produtividade da região, isto é, sobre o Produto Interno Bruto per capita (PIB) foram obtidos do site do IBGE 2012. Esses dados são mostrados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 - PIB e PIB per capita dos municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE 2012).**

<b>Município</b>	<b>UF</b>	<b>PIB (R\$ mil)</b>	<b>População</b>	<b>PIB per capita (R\$)</b>
<b>América Dourada</b>	BA	76.562	15.961	4.796,52
<b>Ibipeba</b>	BA	84.179	17.008	4.872,32
<b>Ibititá</b>	BA	84.715	17.840	4.769,18
<b>Irecê</b>	BA	620.466	66.181	9.188,41
<b>João Dourado</b>	BA	136.585	22.549	5.921,49
<b>Lapão</b>	BA	141.648	25.646	5.493,43
<b>Presidente Dutra</b>	BA	65.538	13.750	4.746,72
<b>Uibaí</b>	BA	62.284	13.625	4.565,61
<b>Bahia</b>		<b>167.727.375</b>	<b>14.016.906</b>	<b>11.966,08</b>

Verifica-se, na Tabela 2.3, que os maiores PIBs são referentes aos municípios de Irecê, Lapão e João Dourado. Em face da significativa representatividade areal na área piloto, Lapão e João Dourado contribuem substancialmente para a produtividade na região. Entretanto, em termos de valores per capita, esses municípios possuem valor menor que o PIB per capita do estado.

Conforme mencionado anteriormente, essa área piloto tem o foco na sua produção agrícola, mas também tem grande potencial no setor comercial, impulsionado pelo município de Irecê, devido a sua posição geográfica. Pesquisas em dados terciários apontam a área como grande produtora de feijão, inclusive recebendo prêmios por este plantio. Porém, quando são observados os dados do IBGE, nota-se que a produção nos últimos anos é ínfima, caracterizando uma curva decrescente ao longo do tempo, segundo se observa na Figura 2.2.



**Figura 2.2: Histórico da produção de feijão na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE 2017).**

Esse notório declínio quanto à produção de feijão pode ser explicado pelos baixos e irregulares índices pluviométricos registrados recentemente na região.

Isto indica que, ao longo do tempo, os investimentos foram se voltando para outros cultivos, como se pode observar na Tabela 2.4, que mostra dados de horticulturas obtidos do Censo Agropecuário de 2006. Nota-se também que o aporte de tecnologia fez otimizar a horticultura que é dependente de irrigação. Os percentuais apresentados na Tabela 2.4 são relativos à produção do estado da Bahia como um todo.

**Tabela 2.4 - Produção de raízes da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá em relação ao estado da Bahia (IBGE, 2017).**

Municípios	UF	Beterraba	Cenoura
América Dourada - BA	BA	13,14%	13,31%
João Dourado - BA	BA	21,51%	24,10%
Lapão - BA	BA	18,61%	27,66%
<b>Área Piloto (produção de todos os municípios)</b>	<b>BA</b>	<b>61,22%</b>	<b>71,67%</b>

Entende-se que a horticultura, focada na produção de beterraba e cenoura, tem a maior contribuição para o PIB primário da região. Destaca-se também o fato de que apenas o município de Lapão, dentre os outros que possuem maior representatividade na área piloto, está entre os que detêm parcela significativa desta produção.

Com relação à produção de lavouras temporárias, destaca-se na região o plantio de cebola, mamona e tomate. Quanto à lavoura de mamona, 60% do que foi produzido na região em 2013 procedeu dos municípios de Lapão e Ibititá. Na Tabela 2.5, pode-se observar o desempenho a nível estadual destes itens.

**Tabela 2.5 - Produção agrícola da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá (IBGE, 2017).**

Municípios	UF	Cebola (Toneladas)
América Dourada - BA	BA	10,63%
Ibititá - BA	BA	3,54%
João Dourado - BA	BA	13,47%
Lapão - BA	BA	3,54%
<b>Área Piloto (produção de todos os municípios)</b>	<b>BA</b>	<b>32,96%</b>

Apesar de ser o 3º menor PIB, o município de América Dourada é o segundo maior produtor de cebola da região. Observa-se também que, apesar de ter o maior PIB, o município de Irecê possui pouca representatividade no cenário agrícola da região, o que indica seu fortalecimento no setor terciário.

Na Tabela 2.6 são mostradas as participações dos setores primário, secundário e terciário no PIB dos municípios.

**Tabela 2.6 - PIB primário, secundário, terciário e total dos municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá, em R\$ mil (Fonte).**

Município	UF	PIB setor primário	PIB setor secundário	PIB setor terciário	PIB TOTAL
<b>América Dourada</b>	BA	12.479	10.073	51.318	76.562
<b>Ibipeba</b>	BA	6.528	17.997	54.527	84.179
<b>Ibititá</b>	BA	7.536	13.274	60.235	84.715
<b>Irecê</b>	BA	13.079	72.910	468.948	620.466
<b>João Dourado</b>	BA	26.141	16.361	87.966	136.585
<b>Lapão</b>	BA	29.225	18.669	88.672	141.648
<b>Presidente Dutra</b>	BA	5.689	8.789	48.405	65.538
<b>Uibaí</b>	BA	4.476	7.508	48.029	62.284

A análise do PIB por setor serve para orientar e estimular os empreendedores no que diz respeito às suas respectivas especialidades. Essa análise se reveste de importância, não apenas para auxiliar em ações que alavanquem o desenvolvimento econômico dos municípios, mas também na aplicação dos recursos resultantes desse desenvolvimento visando a impactar favoravelmente o IDHM da região.

Percebe-se que o setor secundário, relacionado às atividades industriais, é pouco expressivo, respondendo por menos de 25% da produção em todos os municípios da análise.

Irecê destaca-se pelo alto valor do PIB do setor terciário, que corresponde a cerca de 76% do PIB municipal. Isto pode ser explicado não somente pelo bom acesso viário ao município, sendo cortado por duas rodovias estaduais, BA-801 e BA-148, mas também pela existência de expressivos polos de agricultura irrigada na região.

O setor terciário, na região como um todo, é fortemente baseado no agronegócio. Nos demais municípios, além de Irecê, a produtividade agrícola é relevante, mas o escoamento da produção é precário. É necessária uma maior atenção às vias de escoamento desses municípios, no sentido de aumentar seu dinamismo comercial.

Estudos já realizados sinalizam que o aumento do PIB primário, envolvendo a melhoria da produtividade e da qualidade do cultivo de raízes, passa por uma melhoria da irrigação. O sistema predominante na região é o de irrigação por aspersão, seja por microaspersores ou por pivô central, que deve garantir uma lâmina de água próxima à evapotranspiração diária. No caso da cenoura, a cada fase do plantio aumenta-se gradativamente o volume de água para irrigação.

Tendo em vista a forte influência agrícola da região, esta atividade é uma potencial usuária dos recursos hídricos. Nesse contexto verificou-se a realidade dos municípios quanto à infraestrutura básica, representados pelo abastecimento de água e esgotamento sanitário. Adicionalmente, foi verificada a destinação do lixo e existência da energia elétrica para os municípios.

Com isto, dando continuidade à caracterização socioeconômica da região, se pode analisar os dados dos parâmetros elementares relativos ao funcionamento da sociedade no âmbito da área piloto.

### 2.1.2.3 Análise do abastecimento de água

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, da área piloto do riacho do Juá, conforme mostrado na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7 - Fontes de abastecimento de água para os municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Município	UF	Rede geral %	Poço ou nascente				Rio, açude, lago ou igarapé %	Outra %
			Dentro da propriedade %	Fora da propriedade %	Dentro da aldeia	Fora da aldeia		
América Dourada	BA	80,18	4,09	8,86	-	-	0,30	6,57
Ibipeba	BA	85,71	0,79	9,43	-	-	0,22	3,8
Ibititá	BA	92,49	1,34	3,11	-	-	0,06	3,00
Irecê	BA	98,11	0,86	0,17	-	-	0,05	0,81
João Dourado	BA	88,83	4,24	5,04	-	-	0,24	1,65
Lapão	BA	90,66	2,46	3,34	-	-	0,03	3,52
Presidente Dutra	BA	95,64	0,47	0,12	-	-	-	3,76
Uibaí	BA	92,21	0,83	3,14	-	-	0,21	3,60
<b>Bahia</b>		<b>80,34</b>	<b>5,37</b>	<b>5,08</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>2,70</b>	<b>6,49</b>

De acordo com a Tabela 2.7, apenas América Dourada apresenta taxa de abastecimento inferior à do estado da Bahia como um todo. É possível notar ainda que é significativo o percentual da população abastecido por rede. Uma pequena fração da população, não abastecida por rede, conta com abastecimento via poço ou nascente fora da propriedade. Neste caso há que se preocupar com os riscos de veiculação hídrica de doenças, uma vez que esses recursos não são geralmente tratados.

### 2.1.2.4 Análise do saneamento básico

Análogo ao retratado anteriormente, foi avaliada a situação dos municípios da área piloto 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.

Verificou-se, nas zonas urbanas dos municípios, 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 2.8. 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.

**Tabela 2.8 - Formas de esgotamento sanitário para os municípios na área piloto do Riacho do Juá.**

Município	UF	A. Tinham banheiro %	A1.%	A2.%	B. Tinham sanitário %	B1.%	B2.%	C. Não tinham banheiro nem sanitário%
<b>América Dourada</b>	BA	77,60	2,50	75,10	8,51	0,28	8,23	13,90
<b>Ibipeba</b>	BA	91,83	6,36	85,46	3,74	0,14	1,85	4,43
<b>Ibititá</b>	BA	84,00	1,44	82,56	4,15	0,07	1,92	11,85
<b>Irecê</b>	BA	95,82	28,65	67,17	2,23	0,12	4,97	1,95
<b>João Dourado</b>	BA	85,35	4,51	80,84	4,97	5,99	14,01	9,67
<b>Lapão</b>	BA	89,80	10,43	79,37	2,38	0,07	2,13	7,82
<b>Presidente Dutra</b>	BA	86,86	6,85	80,00	3,69	2,87	19,86	9,45
<b>Uibaí</b>	BA	83,12	1,91	81,21	4,93	0,07	3,19	11,96
<b>Bahia</b>		<b>87,18</b>	<b>58,16</b>	<b>41,84</b>	<b>4,90</b>	<b>21,65</b>	<b>78,35</b>	<b>7,92</b>

A análise da Tabela 2.8, 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. Informações quanto à incidência das doenças atribuídas à falta de saneamento básico, na Bahia como um todo e nos municípios em foco, foram buscadas junto ao portal do Ministério da Saúde. O resultado obtido é mostrado na Tabela 2.9.

**Tabela 2.9 - Incidência de doenças associadas à falta de saneamento básico nos municípios da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Área	Doenças				
	Esquistossomose	Leptospirose	Febre Tifóide	Dengue	Hepatite A
<b>Estado da Bahia</b>	2.778,4	60,3	29,7	145.231,0	514,4
<b>Municípios da área piloto Riacho do Juá</b>	35,50	-	6,30	1.202,40	1,50
<b>Proporção (Estado)</b>	19,82	0,43	0,21	1036,11	3,67
<b>Proporção (área piloto)</b>	18,44	-	3,27	624,43	0,78

Sabendo que a população da área piloto contempla 192.560 habitantes, enquanto que a da Bahia é de 14.016.906 habitantes (IBGE, 2010), a proporção dada acima é da incidência das ditas doenças normalizadas por sua respectiva população.

Para o caso da febre tifoide, tem-se incidência per capita superior a do estado da Bahia. As demais, apesar de ter menor incidência em relação ao estado, ainda apresentam proporção considerável, excluindo o caso da hepatite A. Desse modo, fica caracterizada a situação de risco dos residentes da área em estudo no que diz respeito à deficiência da infraestrutura básica.

#### 2.1.2.5 Análise da destinação do lixo

Os municípios da área piloto, frente ao estado como um todo detêm um índice de coleta de resíduos sólidos, efetuada por serviços de limpeza, variável de fraco a muito bom. A destinação do lixo é mostrada na Tabela 2.10, onde ficam caracterizadas duas categorias: lixo coletado e outros destinos.

**Tabela 2.10 - Destino do lixo para os municípios na área piloto do Riacho do Juá.**

Município	UF	Coletado	A1. Coletado por serviço de limpeza	A2. Coletado em caçamba de serviço de limpeza	Outro destino
<b>América Dourada</b>	BA	71,61%	66,36%	5,25%	28,39%
<b>Ibipeba</b>	BA	51,77%	49,31%	2,46%	48,23%
<b>Ibititá</b>	BA	64,45%	55,44%	9,01%	35,55%
<b>Irecê</b>	BA	94,02%	89,02%	5,00%	5,98%
<b>João Dourado</b>	BA	77,12%	43,24%	33,88%	22,88%
<b>Lapão</b>	BA	57,58%	22,47%	35,11%	42,42%
<b>Presidente Dutra</b>	BA	80,72%	80,65%	0,07%	19,28%
<b>Uibaí</b>	BA	90,76%	84,31%	6,45%	9,24%
<b>Bahia</b>		76,21%	80,19%	19,81%	23,79%

América Dourada, Irecê, João Dourado, Presidente Dutra e Uibaí apresentam um percentual de coleta semelhante ou superior ao do estado como um todo. Em Ibipêba, Ibititá e Lapão esse percentual é muito baixo. A deposição do lixo em locais inapropriados, nesses casos, aponta para altas probabilidades de contaminação do subsolo e comprometimento da saúde da população.

### 2.1.2.6 Fornecimento de energia elétrica

Avaliemos agora os municípios da área piloto pela quantidade de domicílios atendidos por energia elétrica, que é um fator indispensável para o bem-estar e para o crescimento econômico.

Observa-se na Tabela 2.11 que todos os municípios apresentam índices de eletrificação acima de 90%, o que caracteriza uma situação confortável em termos de disponibilidade energética.

**Tabela 2.11 - Fornecimento de Energia Elétrica para os municípios na área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Município	UF	Tinham	Não tinham
América Dourada	BA	95,91%	4,09%
Ibipêba	BA	97,17%	2,83%
Ibititá	BA	98,23%	1,77%
Irecê	BA	99,30%	0,70%
João Dourado	BA	97,53%	2,47%
Lapão	BA	98,38%	1,62%
Presidente Dutra	BA	98,44%	1,56%
Uibaí	BA	96,52%	3,48%
Bahia		96,43%	3,57%

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.

A boa distribuição elétrica nessa região pode estar relacionada aos bons índices socioeconômicos conseguidos nos respectivos municípios, como foi possível verificar nos itens anteriores.

### 2.1.3 Demanda Hídrica da Área Piloto do riacho do Juá

O confronto entre a disponibilidade e demanda hídrica é que orienta a elaboração do programa de gestão das águas. A demanda está diretamente ligada à população através do abastecimento de água, dessedentação animal, agropecuária, irrigação para atividades agrícolas e indústria. Nesse cenário, a projeção populacional possibilitará atendimento às informações requeridas acerca da demanda.

Para o presente estudo o Método AiBi, foi o utilizado para projetar populações para cada cinco anos entre 2000 e 2030.

Essa metodologia consiste em admitir que a população varia linearmente com população de área maior, a qual a primeira pertence. Nesse caso, a partir de sua aparente simplicidade, o AiBi necessita projeção populacional de área maior que a de análise, isto é, para projeção das áreas de influência em questão, é preciso estimar população do estado onde está inserida.

A projeção populacional requerida nesse estudo almeja o ano de 2030, sendo este o último ano quando foram estimadas populações das unidades federativas brasileiras. Também serão projetados os dados relacionados aos anos de 2015 e 2020.

A metodologia, portanto, consiste em considerar a área maior em dado momento,  $P(t)$ , e subdividi-la em áreas menores, obtendo a população de determinada área  $i$  na época  $t$ , o  $P_i(t)$ . Nesse caso, a população da área maior corresponderá à do estado da Bahia.

Com a assunção de relação linear com variação da população da área maior tem-se que a população da área menor é

$$P_i(t) = a_i P(t) + b_i \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Em que  $a_i$  é o coeficiente de proporcionalidade do incremento da população na área  $i$  em relação ao incremento da população da área maior e  $b_i$  é o coeficiente linear de correção (Corrêa *et al.*, 2009).

Com essa ferramenta, a projeção populacional por Unidade Federativa permite cálculos para territórios tão menores quanto for o interesse da análise, desde que atendam a condição de  $P_i(t) \subset P(t)$ .

Para determinar a tendência de crescimento das UF, baseou-se nos dados populacionais dos últimos 2 anos obtidos pelo levantamento censitário em 2000 e 2010 junto ao IBGE.

A decomposição da população das áreas 'i', segundo a fórmula citada anteriormente, consiste em duas parcelas, a seguir:

- $a_i P(t)$  – Depende do crescimento da população da área maior, onde  $a_i$  representa a proporcionalidade do incremento da população da área menor  $i$  em relação ao incremento da população maior;
- $b_i$  – Coeficiente linear de correção.

Para determinação desses coeficientes, utiliza-se do mesmo período de 2 anos com dados populacionais conhecidos, 2000 e 2010, a obter-se:

$$P_i(t_0) = a_i P(t_0) + b_i \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$P_i(t_1) = a_i P(t_1) + b_i \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Através da solução desse sistema acima, obtêm-se os valores de  $a_i$  e  $b_i$ .

Assim, o modelo de tendência descrito tem como princípio a subdivisão de área maior, onde a estimativa populacional é conhecida, em áreas menores, partindo do princípio que as partes do todo tenham comportamento igual ao do todo.

Com relação ao *abastecimento humano*, este será dividido em urbano e rural. Partindo dos dados das populações urbana e rural das regiões e da forma de abastecimento a que estavam submetidas, ambos os dados fornecidos pelo IBGE, gerou-se um coeficiente de abastecimento explicado pela relação entre número de domicílios contemplados pela rede geral de abastecimento e o número de domicílios total da região.

Para a dessedentação animal, foi calculado o BEDA (Bovinos Equivalentes para Demanda de Água) – equação 2.4, através da qual, podem-se reunir os diversos tipos de rebanho, considerando as necessidades de água que cada espécie requer em comparação aos bovinos, que possuem uma demanda já pré-estabelecida, da ordem de 50L/cab/dia.

$$\text{BEDA} = \text{Bovinos} + \text{Bubalinos} + ((\text{Equinos} + \text{Muare} + \text{Asininos}) / 1,25) + ((\text{Ovinos} + \text{Caprinos}) / 6,25) + \text{Suínos} / 5 + \text{Aves} / 250. \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Para a demanda industrial utilizou-se, como referência, a metodologia da ONS, que considera a demanda unitária (m<sup>3</sup>/US\$). Assim, foram adotados valores de produção industrial, representados pelo PIB secundário, de cada município, devidamente convertidos para dólares americanos (USD). Esse resultado foi então multiplicado pelo valor de consumo específico para classe 900 (genérica), equivalente a 0,02713 m<sup>3</sup>/USD, de forma a ser obtido a demanda total (m<sup>3</sup>/ano). No presente caso, essa demanda foi posteriormente multiplicada por 365 dias, resultando em demanda hídrica para indústria na unidade de m<sup>3</sup>/dia.

A demanda para agricultura relaciona os dados de “Área Irrigada” com “Vazões de retirada e consumo para irrigação” (Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil, ANA 2005) de forma direta. Para a referente área de estudo, as áreas irrigadas serão convertidas em demanda hídrica através do coeficiente de demanda unitária 0,4 L/s.ha.

As demandas hídricas globais da área piloto do riacho do Juá, envolvendo abastecimento humano, consumo industrial, dessedentação animal e irrigação são mostradas na Tabela 2.12.

**Tabela 2.12 – Demanda Hídrica da área piloto do riacho do Juá (m<sup>3</sup>/dia).**

Área Piloto Riacho do Juá (m <sup>3</sup> /dia)							
Usos Consuntivos	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
<b>Abastecimento Humano</b>	41.600	45.731	49.081	52.027	54.378	55.658	56.368
<b>Industrial</b>	2,39	5,29	6,85	10,92	16,23	24,55	37,73
<b>Dessedentação Animal</b>	3.585	3.942	4.200	4.547	4.922	5.328	5.767
<b>Agricultura</b>	181.659	237.738	285.297	359.248	453.346	573.019	725.172
<b>TOTAL</b>	<b>226.846</b>	<b>287.416</b>	<b>338.584</b>	<b>415.833</b>	<b>512.661</b>	<b>634.030</b>	<b>787.345</b>

### 2.1.3.1 Considerações sobre o abastecimento da região de Irecê

Desde 1994 o abastecimento público de várias sedes municipais da região de Irecê vinha sendo feito pela “Companhia de Saneamento da Bahia - EMBASA” a partir da barragem de Mirorós, sendo a água aduzida pela chamada Adutora do Feijão. As sedes municipais abastecidas até 2008 eram América Dourada, Barra do Mendes, Barro Alto, Cafarnaum, Canarana, Central, Ibipeba, Ibitiá, Irecê, João Dourado, Jussara, Lapão, Presidente Dutra, São Gabriel e Uibaí.

A partir de 2009, entretanto, uma série de períodos chuvosos desfavoráveis, associada a uma intensa utilização paralela do reservatório de Mirorós para irrigação, reduziu drasticamente a reservação dessa barragem. As cidades que eram abastecidas pela Adutora do Feijão passaram então a sofrer severo racionamento.

Antevendo que o prolongamento da estiagem levaria a Barragem de Mirorós ao colapso, a Embasa, com apoio do governo federal, projetou uma captação direta no rio São Francisco para garantir segurança hídrica à população de cerca de 350 mil pessoas da região de Irecê. A resolução ANA 032/2011 outorgou preventivamente à Embasa o direito de captar 23,4 hm<sup>3</sup>/ano do rio São Francisco previstos, inicialmente, para abastecimento público das sedes municipais de América Dourada, Barra do Mendes, Barro Alto, Cafarnaum, Canarana, Central, Ibipeba, Ibitiá, Irecê, Itaguaçu da Bahia, João Dourado, Jussara, Lapão, Presidente Dutra, São Gabriel e Uibaí.

A captação foi implantada no São Francisco no município de Xique-Xique, sendo a água aduzida para Irecê de uma distância de 132 km através da chamada Adutora do São Francisco. A obra foi inaugurada em maio/2013 e em março/2016 distribuía 19,71 hm<sup>3</sup>/ano que abasteciam sete cidades da região de Irecê: Itaguaçu da Bahia, Central, Presidente Dutra, São Gabriel, Jussara, João Dourado e América Dourada.

As considerações acima tecidas levam a admitir que seja ínfima a participação dos poços no abastecimento público das sedes municipais. De acordo com Oliveira (s/data) eram explotados em 1991 22,6 hm<sup>3</sup>/ano de água subterrânea, essencialmente nos municípios de Irecê, João Dourado, América Dourada e Lapão. Dessa descarga explotada 3,9 hm<sup>3</sup>/ano eram destinados ao abastecimento público, o que significa um percentual da ordem de 17%. Essa participação da água subterrânea no abastecimento público, em 1991, pode ser considerada máxima na época, pois a Adutora do Feijão ainda não estava operando.

Assim, em termos de abastecimento público, a água subterrânea abastece apenas distritos, pequenas comunidades rurais, sedes de fazendas e moradias rurais em geral. A grande destinação da água subterrânea na região é a agricultura irrigada.

O rápido crescimento da irrigação tem ampliado consideravelmente a demanda por água subterrânea na região de Irecê. Informações obtidas na CODEVASF<sup>1</sup>, na cidade de Irecê, dão conta de algo em torno de 20.000 poços na bacia de

---

<sup>1</sup> Informações verbais obtidas em visita efetuada em 22/11/2013

Irecê, sendo a metade deles clandestinos (5.000 poços só no município de Lapão que tem área de cerca de 600 km<sup>2</sup>).

### 2.1.3.2 Análise das descargas acumuladas dos poços

Para se analisar a evolução temporal da descarga global de água subterrânea, foi necessário organizar uma série de descargas como mostrado a seguir. Inicialmente os poços disponíveis foram ordenados dos mais antigos para os mais recentes. Foram em seguida organizadas planilhas tal como exemplificado na Tabela 2.13.

**Tabela 2.13 – Modelo de planilha para análise da evolução temporal das descargas de água subterrânea.**

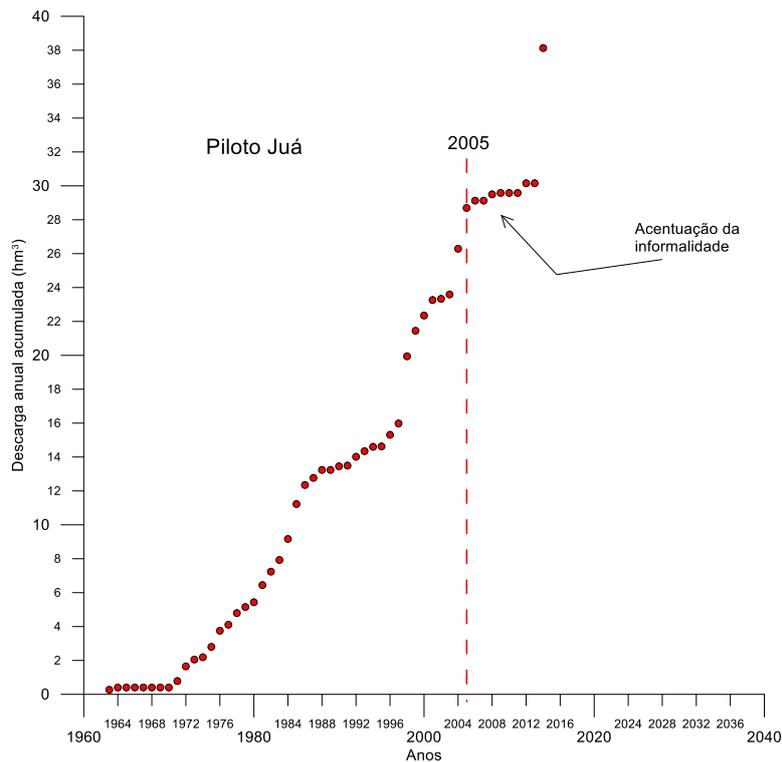
Ano	No de poços	Q global (hm <sup>3</sup> /ano)
1935	2	0,5
1936	5	1
1937	8	1,2
1938	12	1,8
1939	20	2,2
1940	30	3
1941	50	5
....	....	...
TOTAIS	127	14,7

Para uma melhor compreensão da planilha acima exemplificada, imagine-se que a série se inicia em 1935 e que, neste ano, tinham-se apenas dois poços que produziram conjuntamente um volume de 0,5 hm<sup>3</sup>. No ano seguinte foram perfurados 3 novos poços que vieram se somar aos 2 já existentes. Em 1936, portanto, havia 5 poços em funcionamento, que produziram conjuntamente, no ano, 1,0 hm<sup>3</sup>. Isso significa que a descarga do ano anterior se manteve, sendo acrescida da descarga adicional proveniente dos 3 novos poços que entraram em produção em 1936.

As planilhas que foram utilizadas foram montadas desta maneira, do primeiro ao último ano, com as informações disponíveis. Os seguintes pontos devem ser esclarecidos:

- Foram utilizados 386 poços para a área piloto do Riacho do Juá
- Não se conhece o regime de funcionamento dos poços. As informações colhidas em campo, entretanto, apontam para um regime máximo de 12/24 horas na maior parte dos casos. Regimes de bombeamento contínuo podem ocorrer em alguns casos, mas, sem grande significação no cômputo geral. Foi considerado, na área piloto em foco, regimes de bombeamento mais realistas obtidos de análises estatísticas (ver item 6.7.1.3).
- A vazão de bombeamento considerada para cada poço foi a vazão informada em sua ficha de teste de produção, o qual foi geralmente realizado logo após a perfuração. Nos casos onde essa vazão não era informada, as lacunas foram preenchidas com a vazão média da série.

Na área piloto do riacho do Juá observa-se que a taxa de evolução das descargas anuais sofre uma atenuação a partir de 2005 (Figura 2.3).

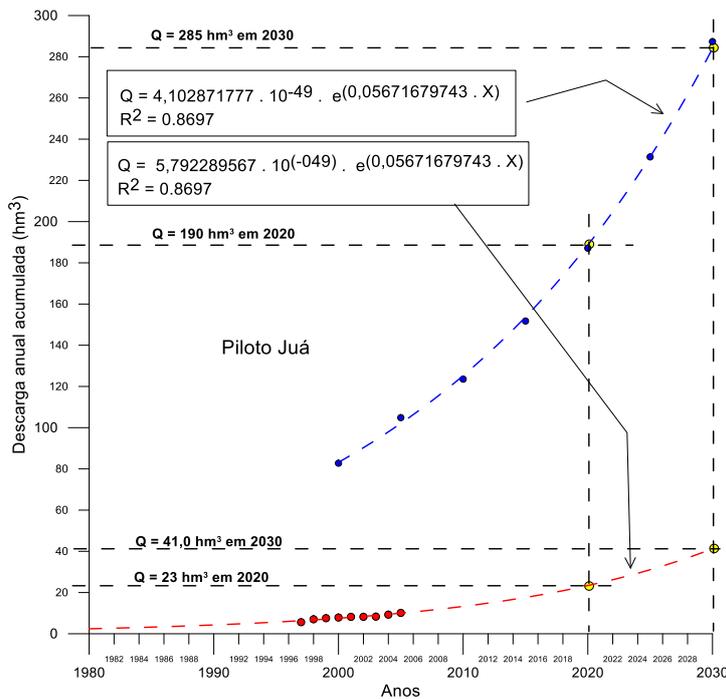


**Figura 2.3: Atenuação das descargas a partir de 2005.**

Como este ano marca uma acentuação da crise climática que vem afligindo a região, seria de se esperar uma intensificação das perfurações e não o contrário. Uma análise dessa questão, com base na experiência de campo, sugere que, efetivamente, a taxa de perfuração se manteve alta, mas, através da informalidade. Assim sendo, considera-se que os dados de descarga a partir de 2005, nos bancos de poços disponíveis, não são confiáveis. Foi, portanto, utilizado como trecho representativo da realidade o intervalo entre 1997 e 2005, com um total de 295 poços.

Na Figura 2.4 mostra-se a evolução anual das demandas globais na área piloto do riacho do Juá (curva em azul), conforme dados da Tabela 2.12. Observa-se que essa evolução se dá de acordo com uma lei exponencial. Mostra-se também, na mesma figura, a evolução das descargas anuais de água subterrânea (curva em vermelho), para 295 poços e regime de bombeamento de 8,5 horas por dia. A adoção desse regime encontra justificativa nas análises apresentadas no item 6.7.1.6 do presente relatório.

A evolução das descargas anuais admite também o ajuste de uma lei exponencial conforme mostrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4: Evolução das demandas globais e da produção de água subterrânea.**

A análise da Figura 2.4 admite os seguintes comentários:

- As demandas calculadas apontam para descargas da ordem de 160 hm<sup>3</sup> em 2016, 190 hm<sup>3</sup> em 2020 e 285 hm<sup>3</sup> em 2030.
- A evolução da descarga de água subterrânea aponta para descargas de 19,0 hm<sup>3</sup> em 2016, 23 hm<sup>3</sup> em 2020 e 41 hm<sup>3</sup> em 2030, no regime de 8,5/24 horas.

É fato sabido que existem muito mais poços operando que aqueles registrados nos cadastros. Na área piloto do riacho do Juá, em foco, a experiência de campo, aliada a consultas aos órgãos locais, aponta para um adicional de cerca de 500%. Dessa forma, considera-se recomendável uma correção dos números acima apresentados. Essa correção é apresentada na Tabela 2.14 a seguir.

**Tabela 2.14 – Descargas de água subterrânea corrigidas**

Ano	Descargas (hm <sup>3</sup> /ano)			
	Lei Exponencial	Fator de correção	Q corrigida	Demanda Irrigação (Tabela 2.12)
2016	19,00	6,08	115,52	131,13
2020	23,00	6,08	139,84	165,47
2030	41,00	6,08	249,28	264,69

Observa-se que as descargas de água subterrânea corrigidas são muito próximas das demandas teóricas avaliadas para irrigação (Figura 2.5). Consideram-se esses resultados verossímeis, da forma como foram obtidos.

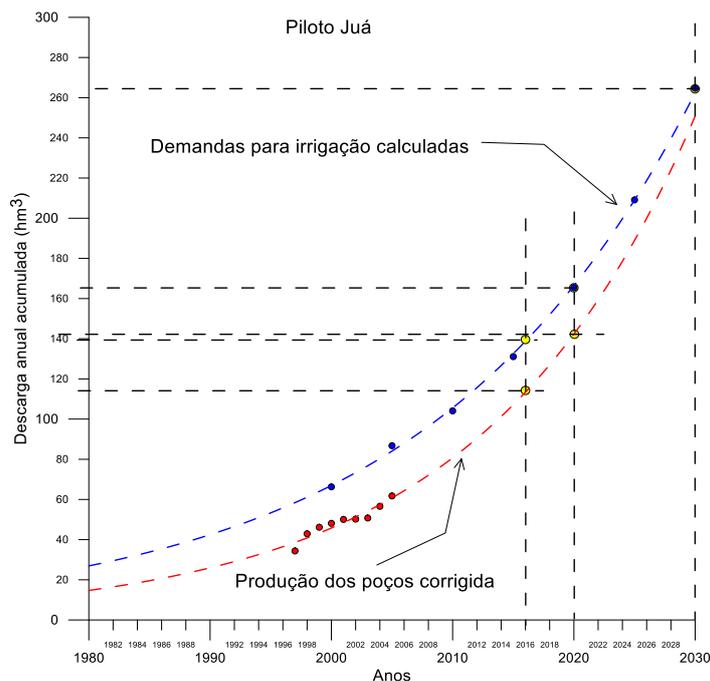


Figura 2.5: Demandas para irrigação e produção dos poços.

### 2.1.3.3 Síntese da situação atual

Procura-se sintetizar, neste tópico, as grandes linhas da situação atual do abastecimento d'água envolvendo as duas principais demandas da área piloto do riacho do Juá, que são: abastecimento público e irrigação. A tabela 2.15 apresenta os principais números obtidos.

Tabela 2.15 – Demandas e respectivos atendimentos

	2015	2020	2030
<b>Demanda calculada: irrigação (hm³/ano)</b>	131,13	165,47	264,69
<b>Produção dos poços (hm³/ano)</b>	115,52	139,84	249,28
<b>Demanda calculada: abastecimento humano (hm³/ano)</b>	18,99	19,58	20,57
<b>Produção da Adutora São Francisco (hm³/ano)</b>	19,71	.....	.....

Os números obtidos para irrigação, e suas projeções para o futuro, sugerem que a água subterrânea é utilizada essencialmente na agricultura irrigada. A produção atual dos poços, mostrada, parece, à primeira vista, compatível com demanda teórica calculada. Nos últimos anos, entretanto, essa produção vem caindo significativamente em decorrência da seca que assola a região desde 2011. A falta de recarga suficiente do Aquífero Salitre fez os níveis d'água regionais caírem para níveis muito profundos, encarecendo e dificultando as perfurações. Muitos dos poços mais antigos, por sua vez, foram desativados porque os níveis de bombeamento desceram abaixo das suas profundidades.

### **3. Meio Físico**

#### **3.1 Rede de Drenagem**

O Riacho do Juá nasce nas proximidades do lugarejo de Gameleira dos Crentes e corre grosseiramente de leste para oeste, passando pela cidade de Lapão e desembocando no Rio Verde, na localidade de Olho d'água, no sopé da Serra do Uibaí. O Rio Verde, por sua vez, corre grosseiramente para norte, indo despejar imediatamente a montante do Lago de Sobradinho. A bacia hidrográfica do riacho do Juá está inserida no domínio morfoclimático do semiárido com chuvas inferiores a 800 mm anuais (PAE-BA, 2010).

A análise do mapa da Figura 3.1 mostra um padrão de drenagem dentrítico/paralelo, com direções NW-SE/NE-SW/E-W. O padrão dentrítico é típico de áreas cobertas por rochas horizontais não fraturadas e isotrópicas em relação à erosão. Constitui um padrão onde os talwegues têm comprimentos variados e não possuem orientação preferencial. No padrão paralelo, por sua vez, os talwegues são paralelos a subparalelos entre si. Típico de regiões onde houve falhamento intenso em uma única direção ou em camadas sedimentares levemente inclinadas em regiões de topografia suave, onde os contatos geológicos se apresentam mais ou menos retilíneos.

Na Figura 3.2, pode-se ver também que o sistema de drenagem da Bacia do Riacho do Juá é composto pelos riachos da Lagoinha, do Meio, da Cachoeira, Água Doce, do Bonito e do Juá.

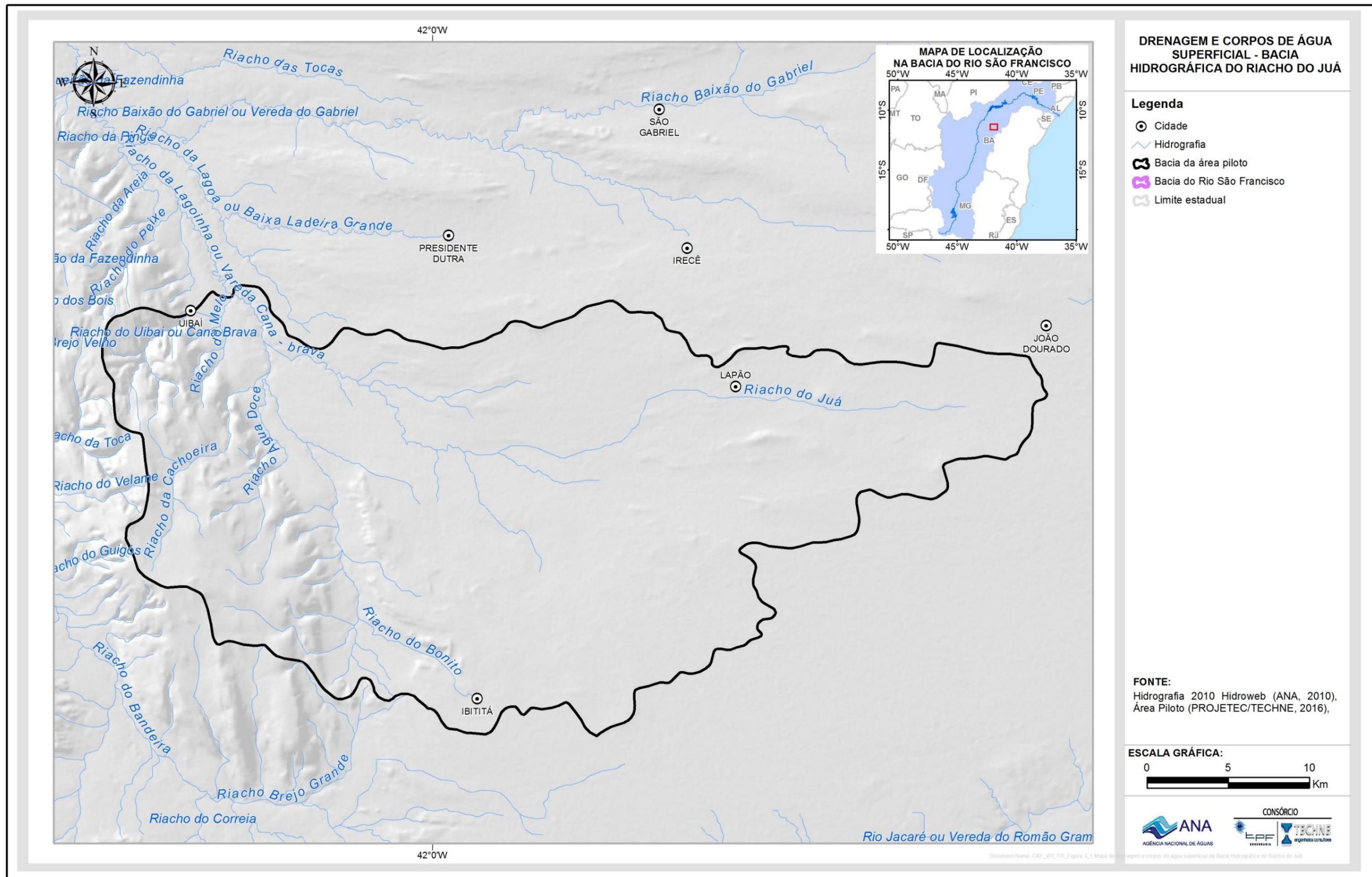


Figura 3.1: Mapa de drenagem e corpos de água superficial da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.



(a)



(b)

**Figura 3.2: Pontos na Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá. (a) Ponto aflorante perene do Riacho do Juá, nascente da Sub-bacia; (b) Trecho perene do Riacho Vereda-Cana-Brava, localizado no povoado de Olho d'água, Município de Uibaí.**

Na porção leste da área piloto, não há corridas perenes de água, a não ser durante os meses de chuva. Outra observação importante é o fato de que nesta porção, o cultivo irrigado de hortifruti é mais denso, o que favoreceu o desmatamento e a não preservação dos leitos dos rios. Na porção oeste da área, a realidade é um pouco diferente, principalmente nas proximidades da Serra do Uibaí, onde alguns riachos são perenes como nas proximidades do Povoado de Olho D'água (Figura 3.3).



(a)



(b)

**Figura 3.3: Fluxos superficiais na área de estudo. (a) Riacho Vereda-cana-Brava nas Proximidades do Povoado de Olho D'água no período de chuva, segundo moradores há cerca de três anos ele passou de um regime de perene para intermitente; (b) Ponto J-101, leito Seco do Riacho do Bonito, Município de Ibititá.**

### 3.1.1 Densidade de drenagem

Usada como parâmetro de grande importância na descrição das bacias hidrográficas, a densidade de drenagem foi definida primeiramente por Horton (1945) como o comprimento médio de rios por unidade de área, podendo ser expressa pela equação que relaciona o comprimento de cursos de água e a área definida para estudo. Silva *et al* (2009) relata que embora pareça uma simples equação, quando aliada a outros parâmetros morfométricos e à ocorrência de determinados processos naturais, pode levar a significativas informações sobre a geomorfologia da região.

No caso da bacia hidrográfica do riacho do Juá, observa-se uma grande área com baixa densidade de drenagem, na porção leste, envolvendo as cidades de Gameleira, Lapão e João Dourado (Figura 3.4). Essa densidade aumenta para oeste, chegando à classe média nas bordas ocidentais da bacia. De acordo com Silva *et al* (2009), pode-se dizer que a densidade de drenagem é, predominantemente, da classe baixa, com trechos pertencentes à classe média (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1 – Classificação da densidade de drenagem. Fonte: Silva *et al* (2009).**

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

### 3.2 Unidades de solo

De acordo com a EMBRAPA (2013), as principais unidades de solo que ocorrem na área de estudo são:

**Cambissolos** - Sua principal característica é o Horizonte B incipiente, sem o A chernozêmico (exceto se Tb). São solos subsuperficiais pouco desenvolvidos. A variação da espessura pode ser justificada pelo arcabouço estrutural no qual as rochas da Formação Salitre estão arrançadas. A classe dos Cambissolos Háplicos é a predominante ao longo da bacia. Segundo a EMBRAPA, os Cambissolos Háplicos são identificados normalmente em relevos forte ondulados ou montanhosos, que não apresentam horizonte superficial A Húmico. São solos de fertilidade natural variável, apresentando como principais limitações para uso, o relevo com declives acentuados, a pequena profundidade e a ocorrência de pedras na massa do solo.

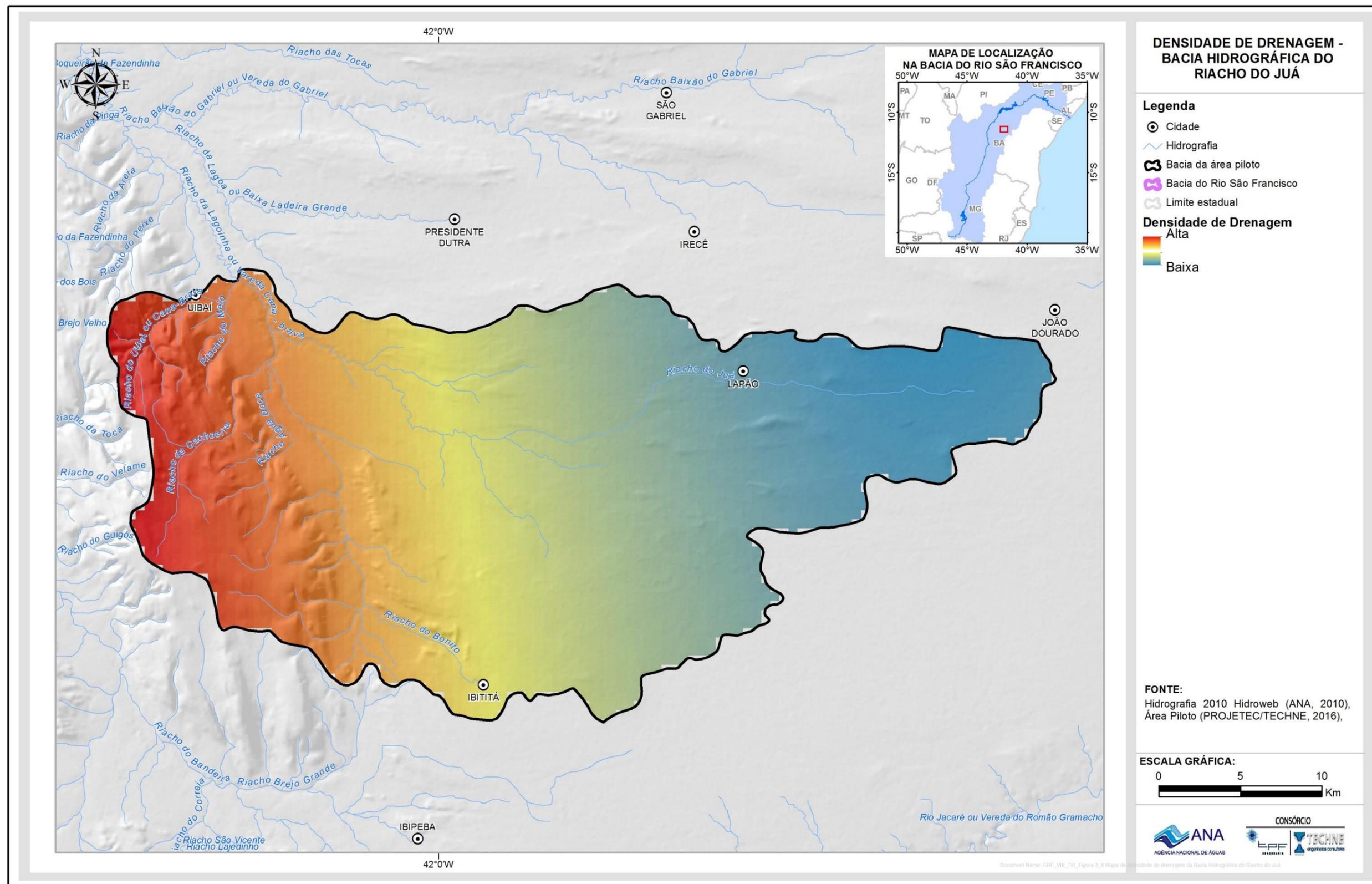


Figura 3.4: Mapa de densidade de drenagem da Bacía Hidrográfica do Riacho do Juá.

**CXbe - Cambissolo háptico Tb eutrófico** - Restrito ao extremo NE da área estudada, mais precisamente nas proximidades dos Povoados de Conquista e Gameleira, no município de João Dourado. São solos com argila de atividade baixa, alta fertilidade e saturação por bases alta ( $V \geq 50\%$ ) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (BRASIL, 1976, v.12, p.254, perfil 16).

Na Figura 3.5 pode ser observado um padrão de solos com matriz amarronzada, textura argilosa ou muito argilosa, rasos a moderadamente profundos e bem drenados.



**Figura 3.5: Ponto J-044, Povoado de Conquista, município de João Dourado.**

**CXk - Cambissolo háptico carbonático** - Esta unidade é a mais representativa no que diz respeito à área territorial ocupando mais de 70% da área piloto. São solos com caráter carbonático ou com horizonte cálcico em um ou mais horizontes, dentro de 120 cm da superfície do solo. Esse solo possui o carbonato de cálcio em alta quantidade sem que este afete a maioria das plantas.

**Latossolos** - Correspondem a solos com o horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A, ou seja, subsuperficial muito intemperizado e sem acúmulo de argila.

**LVAe – Latossolo vermelho-amarelo eutrófico** - Sua ocorrência está restrita ao extremo W, como uma faixa contínua e estreita orientada N-S. Esses solos apresentam saturação por bases alta ( $V \geq 50\%$ ) na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA). Ocorrem em ambientes bem drenados, sendo muito profundos e uniformes em cor, textura e estrutura em profundidade. São muito utilizados para agropecuária principalmente por não terem limitações de ordem química e terem alta fertilidade. Em condições naturais, os teores de fósforo são baixos, sendo indicada a adubação fostatada. Outra limitação ao uso dessa classe de solo é a pouca disponibilidade de água para as plantas.

**LAd – Latossolo amarelo distrófico** - Ocorre intensivamente na zona sudoeste da área piloto. Segundo a Embrapa (2006), esse é um solo de horizonte superficial modificado por ação antrópica contínua, representada por adição de matéria orgânica em sua camada mais superficial. São solos com acúmulo de argila abaixo da superfície ou horizonte B textural dentro de 200 cm da superfície. A cor amarelada desses solos é uniforme em profundidade, o mesmo ocorrendo com o teor de argila. A textura mais comum é a argilosa ou muito argilosa. Outro aspecto de campo refere-se à elevada coesão dos agregados estruturais.

**Neossolos** - Sem horizonte B diagnóstico, esta ordem corresponde a solos jovens ou neoformados. Os Neossolos Litólicos são a segunda classe mais predominante na bacia e compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos. As limitações ao uso estão relacionadas a pouca profundidade, presença da rocha e aos declives acentuados em suas áreas de ocorrência. Estes fatores limitam o crescimento radicular, o uso de máquinas e elevam o risco de erosão. Sua fertilidade está condicionada à soma de bases e à presença de alumínio, sendo maior nos eutróficos e mais limitada nos distróficos e alícos. Os teores de fósforo são baixos em condições naturais (Santos, H. G. et al, 2013).

**RLd – Neossolo litólico distrófico** - Esta unidade está presente no extremo oeste da área piloto recobrendo os metarenitos e quartzitos da Formação Morro do Chapéu. Sua composição é essencialmente quartzosa, com granulometria variando de fina a grossa e coloração esbranquiçada a creme.

Na Figura 3.6 pode ser observado que esses solos são pouco desenvolvidos, rasos ou muito rasos, possuindo apenas um horizonte A assentado diretamente sobre a rocha.



**Figura 3.6: Ponto J-025, localizado no município de Uibaí.**

**RLe – Neossolo litólico eutrófico** - Solos com saturação por bases alta ( $V \geq 50\%$ ) (DNPM, 1973e, p.337, perfil RS-38).

A Tabela 3.2 com as unidades de solo da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá foi confeccionada de acordo com o mapa da Figura 3.7.

**Tabela 3.2 – Área, porcentagem e tipos das unidades de solo da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Unidades de solo	Hectares (ha)	Porcentagem (%)
<b>Cambissolo háplico carbonático</b>	71809,292	74,36%
<b>Cambissolo háplico Tb eutrófico</b>	599,579	0,62%
<b>Latossolo amarelo distrófico</b>	7274,913	7,54%
<b>Latossolo vermelho-amarelo eutrófico</b>	4147,069	4,29%
<b>Neossolo litólico distrófico</b>	11298,690	1,49%
<b>Neossolo litólico eutrófico</b>	1435,988	11,70%

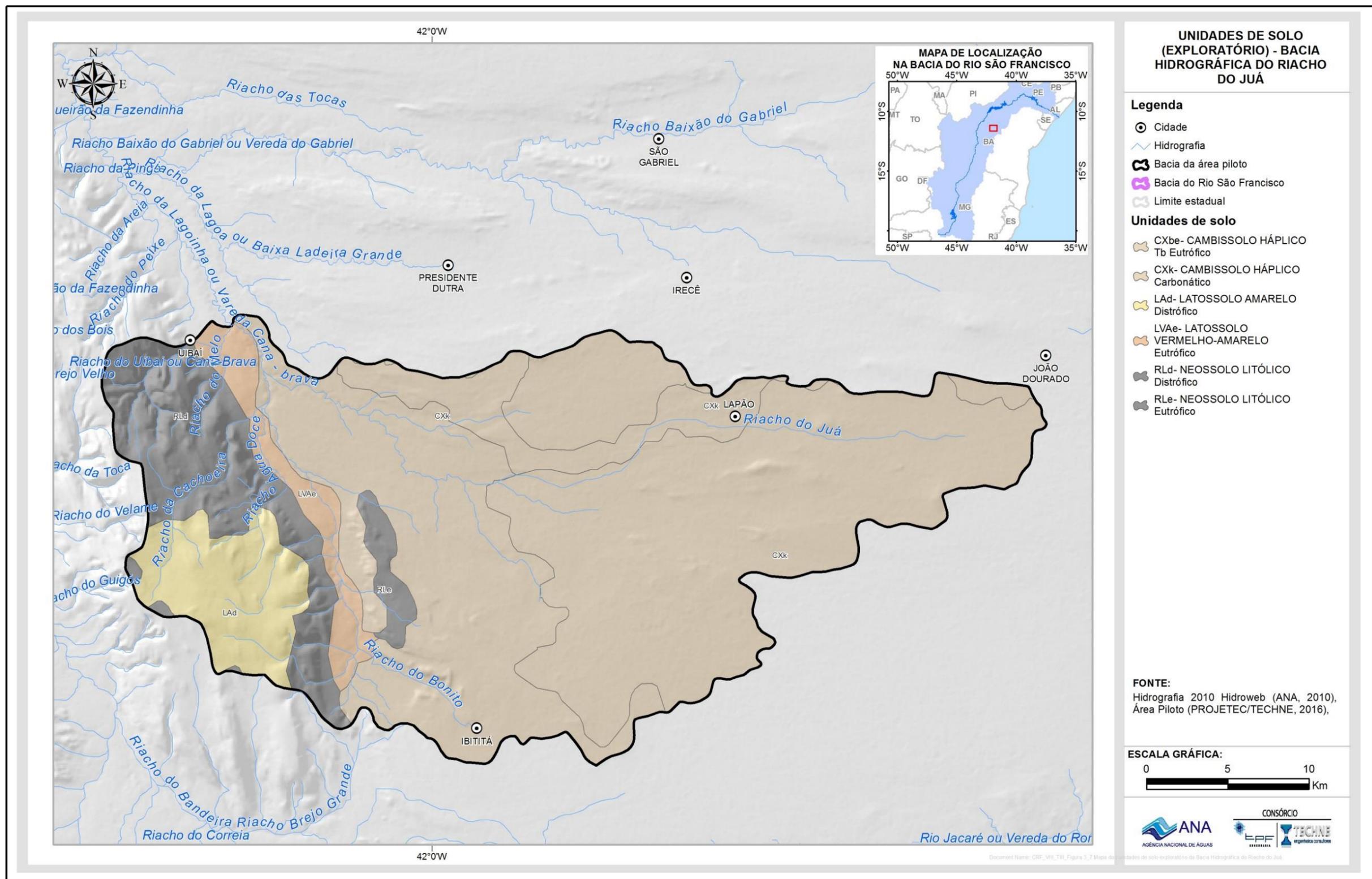


Figura 3.7: Mapa das unidades de solo (exploratório) da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

### 3.3 Classes de vegetação

Por possuir um clima bem definido, com alternância de período seco e úmido, a região apresenta na sua maior extensão, uma paisagem com formações vegetais do tipo caatinga, com espécies de porte variável e caducifólias de caráter xerófilo, com grande quantidade de plantas espinhosas (EMBRAPA, 2000).

Ainda segundo a Embrapa (2000), estudos sobre a flora xerófila das áreas do calcário Bambuí, com levantamento em várias estações botânicas, revelam a existência de uma flora particular relacionada ao condicionamento edáfico, representada, dentre outras, pela *Cavanillesia arborea* (barriguda).

De acordo com a Figura 3.9 foi confeccionada a Tabela 3.3, que mostra que na área piloto 80% de atividades são agrárias, o que resultou numa vegetação bastante antropizada e degradada, com apenas 20% de savana estépica florestada. O tipo de vegetação associado a atividades agrárias é a mais comum, ocupando 77.380,27 hectares, que corresponde a 80% da área piloto da bacia do Riacho do Juá.

**Tabela 3.3 – Área e porcentagem da vegetação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

Vegetação	Hectares (ha)	Porcentagem (%)
Atividades agrárias	77.380,27	80
Savana estépica florestada	19.185,12	20
<b>Total</b>	<b>96.565,39</b>	<b>100%</b>

As regiões de atividades agrárias são aquelas onde não existe vegetação natural, ou seja, houve uma intervenção humana na área. Desse modo, uma vegetação natural foi retirada através de um conjunto de técnicas utilizadas para cultivar novas plantas, vegetais ou produtos agrícolas com o objetivo de obter alimentos, fibras, energia, matéria-prima para roupas, construções, medicamentos, ferramentas, ou apenas para contemplação estética (Figura 3.8).



**Figura 3.8: Exemplos da ação antrópica na área em estudo. (a) Vista de uma Fazenda de cultivo de tomate no município de Lapão, margem direita da BA432 sentido Irecê; (b) Fazenda Circo (Poço J-056P) localizada no Povoado de Circo, Município de Ibititá, Irrigação de milho.**

Com uma área de aproximadamente 19.185 hectares e representando 20% da área total da Bacia do Riacho do Juá, a savana estépica florestada está predominantemente localizada na porção oeste da área em estudo.

Subgrupo de formação, caracterizado por micro e/ou nanofanerófitos, com média de até cinco metros, ultrapassando excepcionalmente os sete metros de altura, mais ou menos densos, com grossos troncos e esgalhamento bastante ramificado, em geral provido de espinhos e/ou acúleos, com total decidualidade na época desfavorável.

### **3.4 Declividade**

A área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá apresenta baixas declividades, ou seja, a região possui predominantemente pequenas variações de altitudes. O mapa de declividades (Figura 3.11) muito se assemelha ao mapa geomorfológico que será apresentado na Figura 3.16. Nesta última é possível ver que essa região abriga basicamente duas formas de terreno: Chapada de Irecê e as Serras da Diamantina, duas classes com grande influência e uma terceira (Baixadas dos Rios Jacaré/Salitre) não tão influente na declividade da região em estudo.

A Chapada de Irecê caracteriza a porção central e oeste da região de Irecê (Figura 3.10), incluindo cidades como Lapão, Gameleira e João Dourado. É uma região com cotas do terreno variando entre 600 e 800 metros (SRTM). Seguindo os rios da área regional pelas baixadas dos rios Jacaré/Salitre em direção ao Rio São Francisco, é possível observar a cota do terreno decrescendo suavemente ao longo das margens, podendo chegar aos 400 metros (SRTM). Na Chapada de Irecê tem-se um relevo com baixa declividade variando entre as categorias planas (0 a 3%) a suavemente ondulada (3 a 8%) (Tabela 3.4).

A segunda classe, Serras da Diamantina, possui maiores altitudes e declividades acentuadas na transição para a Chapada de Irecê. Nas encostas da serra as declividades podem ser maiores que 90%, sendo o relevo classificado como escarpado, segundo o manual da Embrapa. Nas áreas centrais da Serra do Uibaí ocorrem suaves variações de altitude entre 900 metros (SRTM) a cerca de 1100 metros (SRTM).

A Figura 3.10 mostra uma vista panorâmica tomada da meia encosta da Serra do Uibaí. Descortina-se, para leste, a vasta planura onde se distinguem as cidades de Irecê e Presidente Dutra.

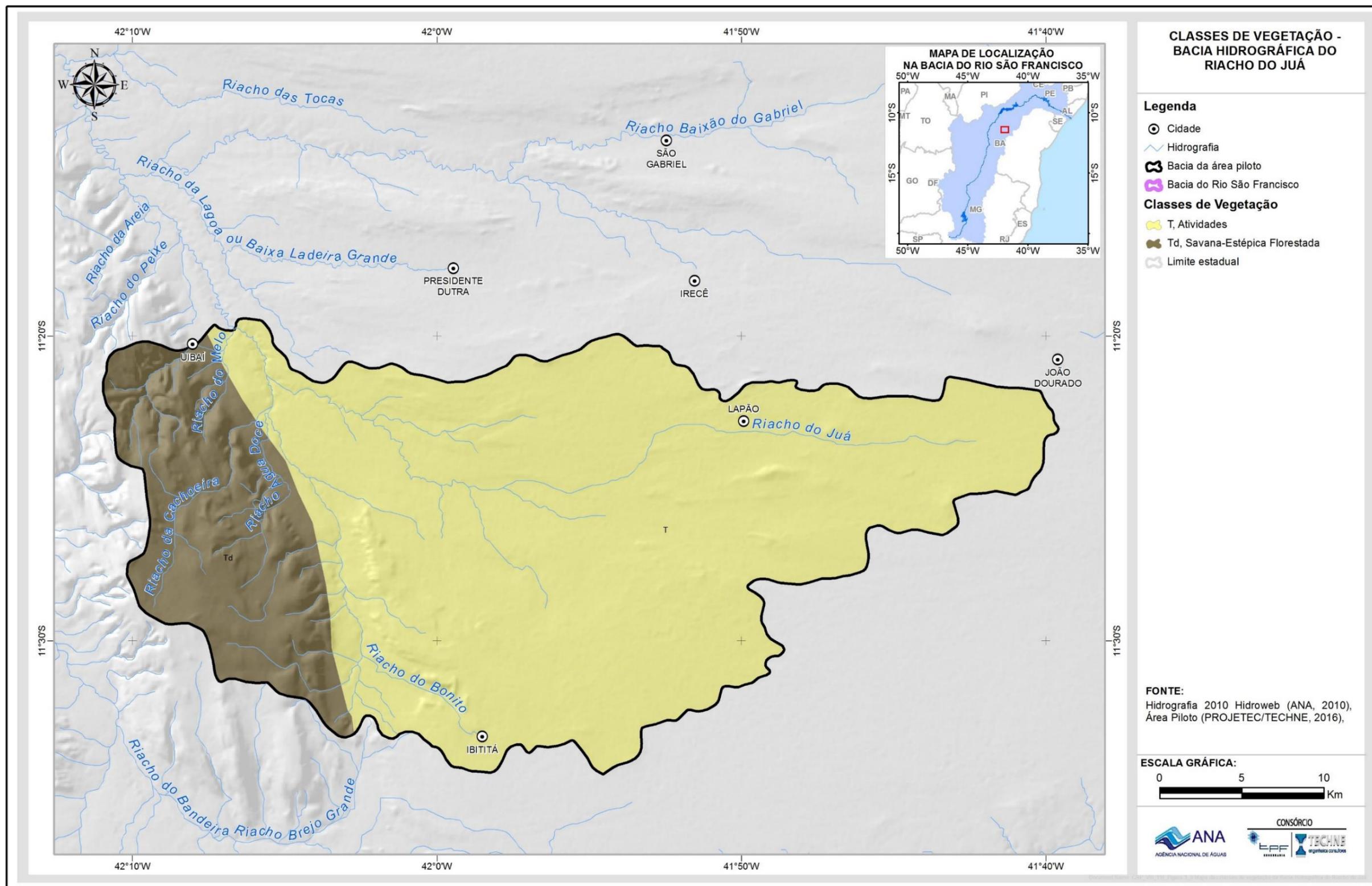
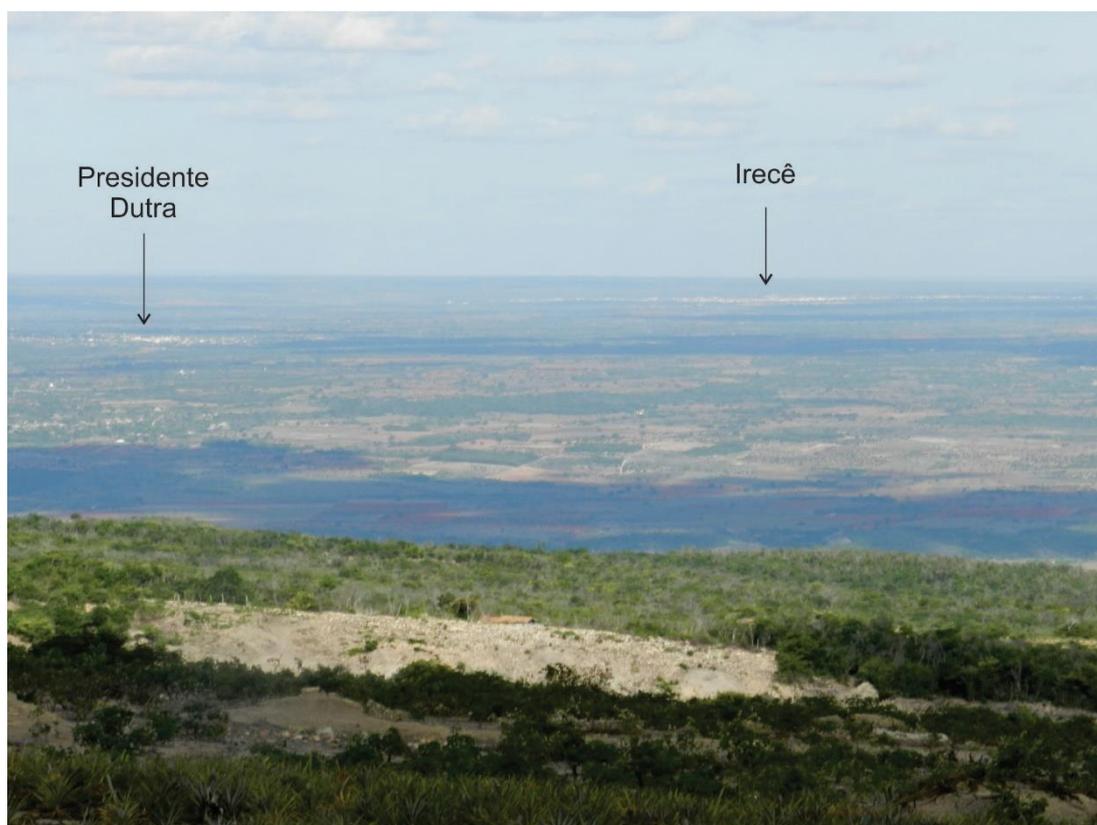


Figura 3.9: Mapa das classes de vegetação da Bacía Hidrográfica do Riacho do Juá.

**Tabela 3.4 – Classificação de Declividades a partir do relevo. Fonte: Embrapa (1979).**

Relevo	Declividade (%)
Plano	0 – 3
Suave Ondulado	3 – 8
Ondulado	8 – 20
Forte Ondulado	20 – 45
Montanhoso	45 – 75
Escarpado	>75



**Figura 3.10: Declividade acentuada na encosta oriental da Serra do Uibaí. Ao fundo, a cidade de Irecê.**

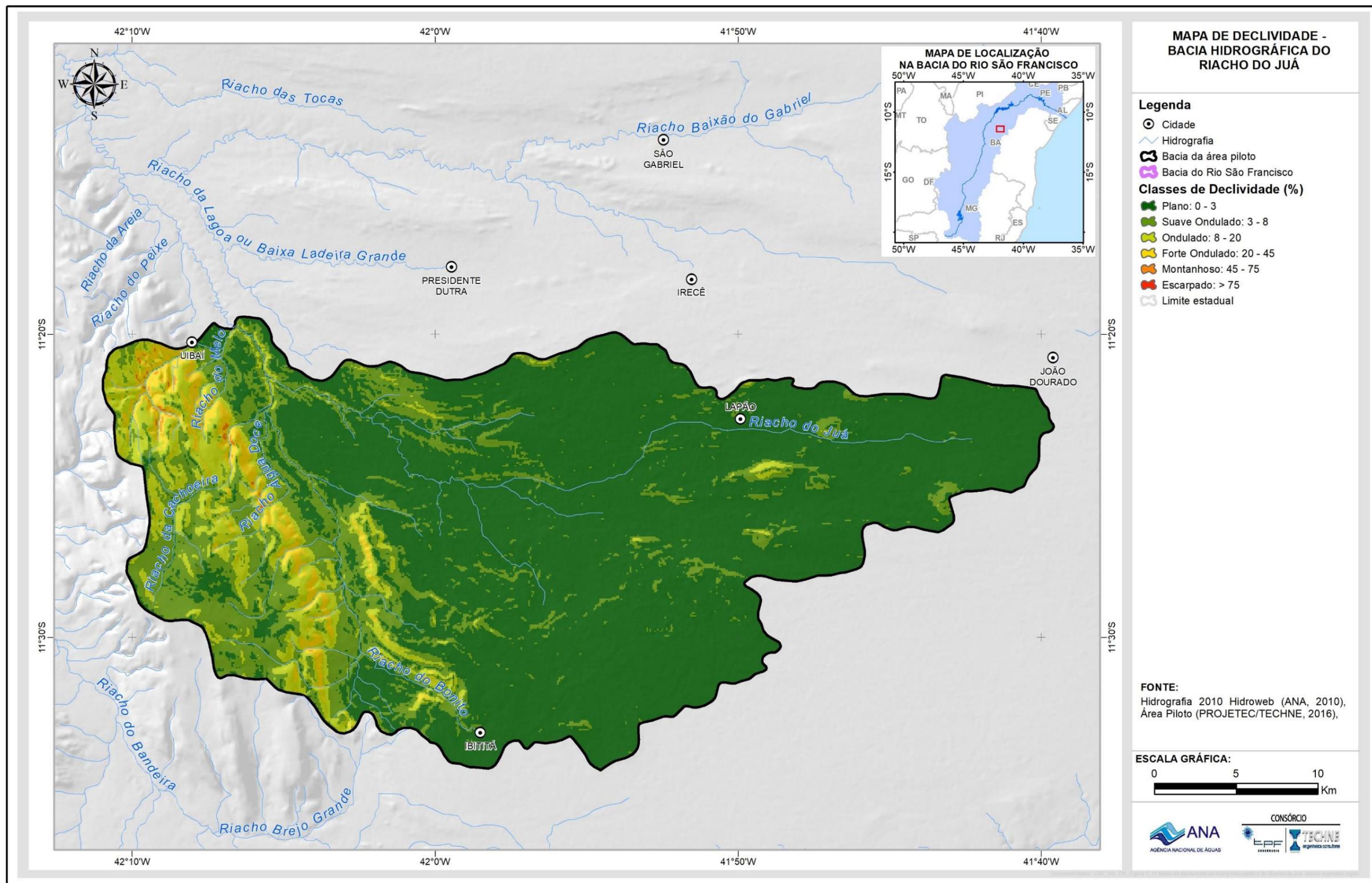


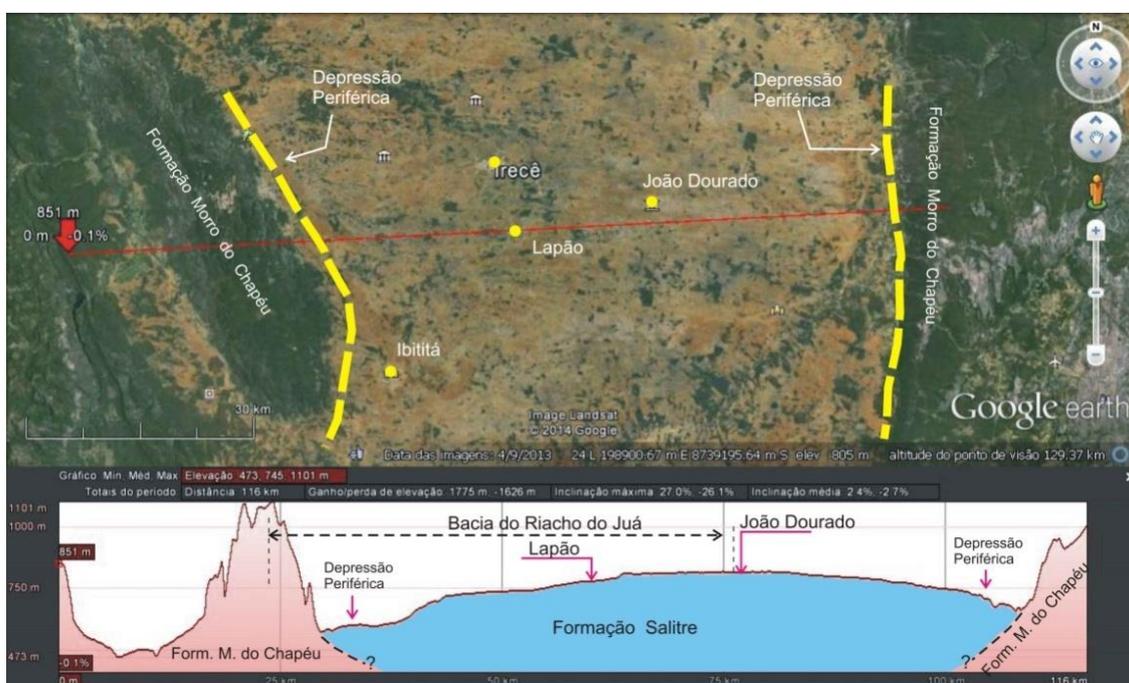
Figura 3.11: Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

### 3.5 Geomorfologia

Três feições geomorfológicas se destacam na região de Irecê. São elas: a Chapada de Irecê; a baixada dos rios Jacaré e Verde; e as serras da Chapada Diamantina (ZEE-Bahia, 2013). Essas feições são discutidas a seguir.

#### 3.5.1 Chapada de Irecê

Essa unidade geomorfológica apresenta uma superfície abaulada, modelada nas rochas carbonatadas da Formação Salitre. Essa superfície, com pequena variação altimétrica, é conhecida na literatura geológica como Platô de Irecê, limitado, a leste e a oeste, por cristas da Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina. (Figura 3.12). Os maiores rios da região, o Rio Verde e o Rio Jacaré (Vereda do Romão Gramacho), contornam o Platô de Irecê respectivamente, pelo seu lado ocidental e pelo seu lado oriental (Figura 3.13), mal cortando as regiões marginais da bacia calcária e fluindo predominantemente sobre rochas do Grupo Chapada Diamantina. Despejam ambos, no lago de Sobradinho.



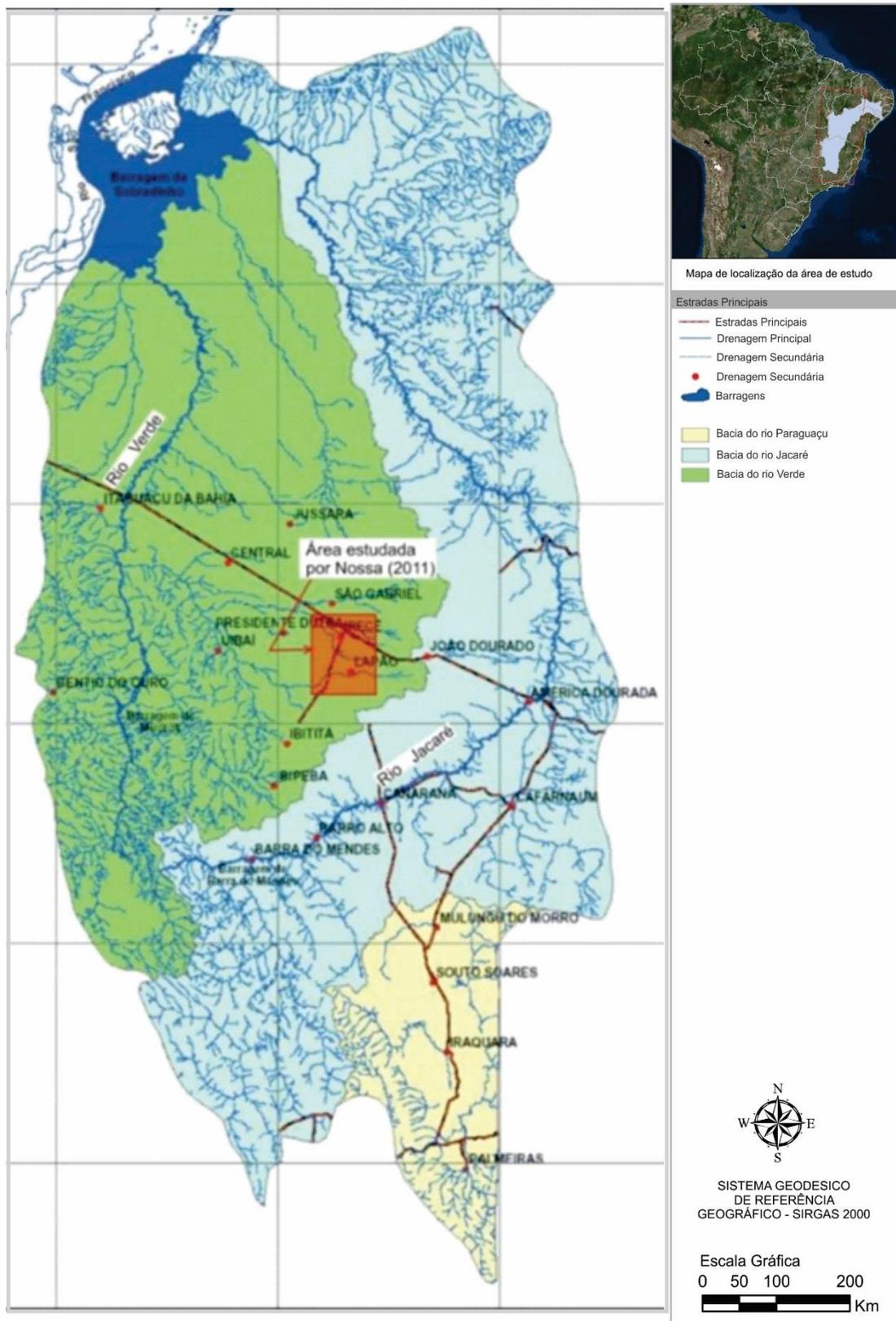
**Figura 3.12: A Bacia do Riacho do Juá no contexto do Platô de Irecê. Topografia do Google Earth. Geologia esquemática obtida de CPRM/CBPM (2003).**

Nos limites leste e oeste do Platô de Irecê ocorrem depressões periféricas conforme mostrado na Figura 3.6. As cotas variam de 600 a 670 m nas depressões periféricas até valores máximos da ordem de 800 m na parte mais alta, nas proximidades de João Dourado. Os quartzitos da Formação Morro do Chapéu, na parte oeste da área em estudo, apresentam cotas acima dos 1000 metros. A Bacia do Riacho do Juá está situada no flanco ocidental do abaulamento do Platô de Irecê (Figura 3.12).

Na figura 3.13 têm-se dois panoramas do Platô de Irecê vistos da meia encosta da Serra do Uibaí, esculpida em quartzitos da Formação Morro do Chapéu.



**Figura 3.13: Vista de dois ângulos da chapada de Irecê.**



**Figura 3.14: Bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré. Adaptado de Silva (2005)**

### 3.5.2 Baixada dos Rios Jacaré/Verde

Essa unidade geomorfológica é pouco representada na área piloto da Bacia do Riacho do Juá (Figura 3.16). Ela ocorre discretamente, apenas imediatamente a noroeste da cidade de Uibaí. Foram identificados nessa área alguns planos rampeados na direção do Vale do São Francisco, inumados por depósitos areno-argilosos cenozoicos. Nos vales do Rio Verde e do Rio Jacaré ou Vereda do Romão Gramacho, onde afloram os sedimentos calcíferos da Formação Caatinga, desenvolveu-se um carste coberto por material de alteração da cobertura preexistente, com feições em superfície, originadas pela dissolução do calcário, representadas principalmente pelas dolinas, muito concentradas na margem esquerda do Rio Jacaré. Esse rio e o Verde apresentam vales encaixados com encostas íngremes esculpidas nos calcários, com trechos em cânion.

### 3.5.3 Serras da Chapada Diamantina

Essa unidade ocorre apenas no extremo oeste da área piloto (Figura 3.16), apresentando cotas elevadas e uma feição topográfica esculpida em arenitos, contrastante com o relevo geral da área. A Figura 3.15 ilustra essa feição, que corresponde ao flanco ocidental da Chapada Diamantina onde o sistema de dobramentos afetado pela tectônica de falhas gerou cristas alinhadas com vertentes íngremes, escarpas adaptadas a falhas e escarpas monoclinais, além de cristas assimétricas (*hogbacks*) e vales estruturais. O piso da depressão é formado por rampas arenosas. Os blocos que compõem essa unidade são conhecidos como serras.



**Figura 3.15: Visão da extensão da Serra da Diamantina e o quartzito exposto no alto da serra.**

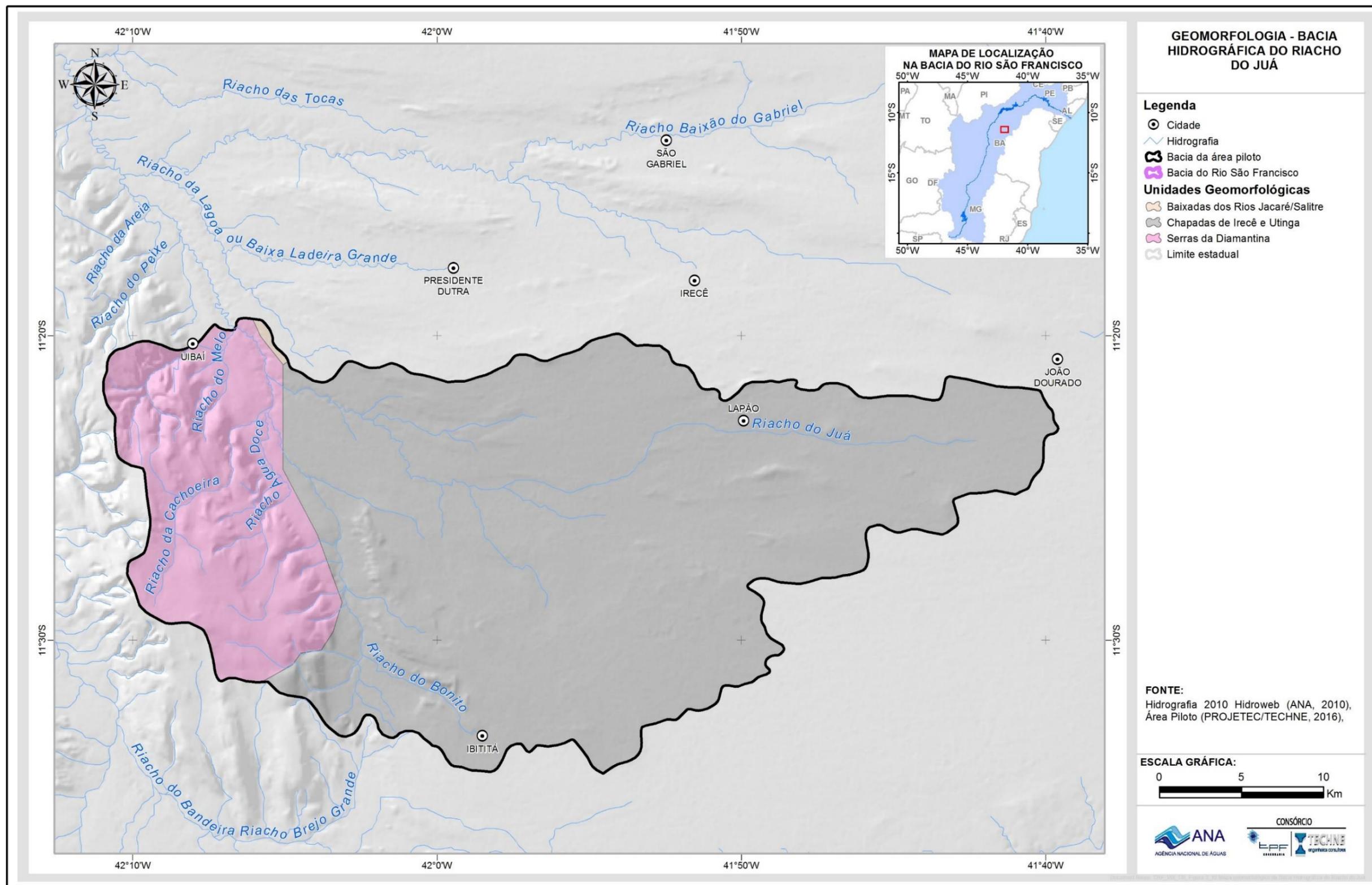


Figura 3.16: Mapa geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

### 3.6 Uso e ocupação do solo

Na Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá a agricultura irrigada é extensivamente praticada. Devido aos baixos índices anuais pluviométricos e sua irregularidade, o cultivo de sequeiro foi perdendo espaço para o cultivo irrigado e a diversificação da produção agrícola foi a saída encontrada pelos produtores para superar a grave crise enfrentada no final dos anos de 1980 e início dos anos de 1990. A região chegou a ser a segunda maior produtora de feijão do país, mas, devido às grandes perdas ocorridas, os produtores derivaram para o cultivo, também, de hortícolas, com ênfase para cenoura, cebola, pinha e tomate que, hoje, abastecem anualmente os estados da região Norte, Nordeste e Sul do país. Os municípios envolvidos apresentam como atividade essencialmente o agronegócio com participação insignificante da indústria e do comércio (Tabela 3.5).

**Tabela 3.5: Principais cultivos nas cidades da área piloto da Bacia do Riacho do Juá (Cardoso et al, 2015).**

Município	Principal cultivo	Área delimitada (km <sup>2</sup> )
<b>América Dourada</b>	Tomate	4,65
<b>Ibititá</b>	Tomate, cenoura e cebola	250,05
<b>João Dourado</b>	Cebola, tomate e beterraba	51,26
<b>Lapão</b>	Tomate, cenoura, cebola e pimentão	251,19
<b>Presidente Dutra</b>	Pinha e tomate	12,52
<b>Uibaí</b>	Pinha, tomate, abacaxi e pimentão	332,29
<b>Irecê</b>	Tomate, cenoura e cebola	57,54
<b>Ibipeba</b>	Banana	5,99

Como exemplo de produção na área estudada, o município de Presidente Dutra é reconhecido como a capital mundial da pinha, que é responsável por cerca de 70% da renda do município. Todo ano produz cerca de 45.000 toneladas do produto, sendo toda a produção mantida pela irrigação.

Os produtores são de dois tipos: a) proprietário da terra: nesse caso a terra foi adquirida, seja por compra ou herança; b) arrendatário – aquele que arrenda um terreno, cujo limite vai depender do tipo de cultura, do tempo de cultivo e perspectiva de produção.

O clima quente e seco combinado ao uso de irrigação favorece o cultivo de hortifrutícolas durante o ano todo, inclusive em períodos de entressafra de outras regiões, o que tende a proporcionar boas remunerações aos produtores baianos. A dependência da irrigação, por sua vez, condiciona os investimentos na região à disponibilidade de água. Nos últimos anos, esse tem sido o principal problema enfrentado pelos produtores de Irecê, Lapão e João Dourado, forçando-os a aprofundar os poços para continuar a irrigação. Além de inibir os investimentos, a disponibilidade de água também limita o tamanho das propriedades, já que essas devem ser próximas às fontes de água.

Em média, produtores têm áreas de aproximadamente 5 (cinco) hectares, o que impossibilita ganhos de escala. Produtores da região de Irecê comercializam principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Com a recente melhora das condições rodoviárias de importantes vias interestaduais, a produção é escoada sem grandes problemas. No entanto, para regiões mais distantes, como Manaus e Belém, ainda há dificuldades para o envio de frutas e hortaliças e o preço dos fretes acompanha a média nacional.

A distância das fazendas baianas em relação aos centros consumidores é um importante componente do preço dos produtos. Os desafios para os próximos anos consistem em buscar alternativas que maximizem o aproveitamento dos recursos hídricos da região, como projetos de irrigação. Alguns produtores dividem a atividade agrícola com a pecuária de gado, caprinos e ovinos, como uma alternativa para a diminuição do prejuízo com hortifruti, devido à sazonalidade desse mercado.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 3.17: Exemplos de culturas na Bacia do Riacho do Juá: (a) Cultura familiar, comum no centro urbano dos municípios. Fazenda Boa Sorte (Poço J-001P), município de Lapão, irrigação de feijão, sorgo e milho; (b) Fazenda de irrigação de pinha, margens da BA-225, Município de Presidente Dutra; (c) Fazenda de irrigação de tomate, margens da BA-432, município de Lapão; (d) Fazenda Circo com irrigação de milho (Poço J-056P), município de Ibititá.**

De acordo com o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 3.18), a Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá possui 0,16% de área urbanizada, 10,77% de lavoura temporária, com destaque para a cultura de feijão, cenoura, beterraba e cebola, sendo o município de Lapão o maior produtor de cenoura do Brasil e muito conhecido nacionalmente por sua potencialidade agrícola.

Essa região também possui 31,48% de área florestal e 57,58% de área campestre. A região de Irecê cultivou feijão por mais de 40 anos, o que provocou a redução de reservas hídricas, salinização, compactação dos solos, aceleração dos processos de erosão, perda de produtividade agrícola e êxodo rural.

A classe definida como sem informação (aproximadamente 0,01%) representa pontos de incerteza entre a resposta espectral e os diversos usos no espaço real. Com isso, alguns pontos que estão com solo exposto podem estar sendo preparados para cultivo ou podem ser um indicativo de degradação ambiental.

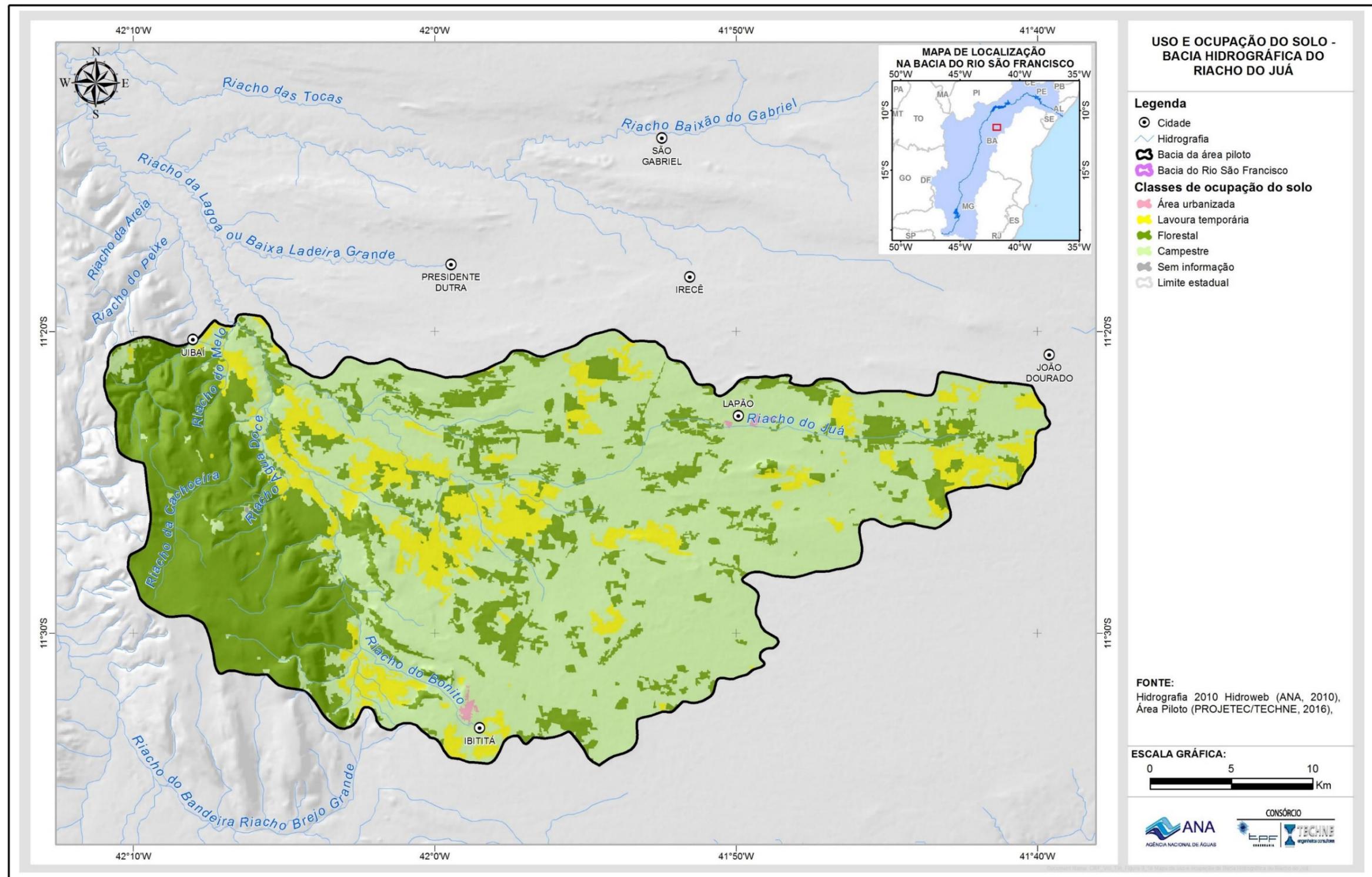


Figura 3.18: Mapa de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

## 4. Geologia

### 4.1 Geologia regional

A área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá situa-se no flanco oeste do chamado Platô de Irecê. Este se caracteriza como um grande sinclínório, constituído por calcários do Grupo Una, ladeados por serranias mantidas por quartzitos do Supergrupo Espinhaço (Figura 4.1). Esse sinclínório exibe uma grande diversidade estrutural, apresentando uma geometria em “V”, forma esta associada aos esforços compressivos durante a orogênese Brasileira (Kuchenbecker *et al*, 2011).

Nesse setor do Cráton, as rochas carbonáticas da Formação Salitre do Grupo Una encontram-se estruturadas segundo um conjunto de falhas e dobras com traços curvilíneos e orientação geral E-W contrastando com a orientação N-S da Formação Morro do Chapéu no contato da borda W da Bacia de Irecê.

O Supergrupo Espinhaço na área é representado pela Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina do Supergrupo Espinhaço; e pelas formações Bebedouro e Salitre do Grupo Una do Supergrupo São Francisco. Embora a região tenha uma conformação geométrica semelhante a uma bacia, observa-se na realidade uma estruturação tectônica mais complexa. O Grupo Una mostra um sistema mais proeminente de dobramentos e empurrões de direção E-W e vergência para sul, mais intensos ao norte e esmaecendo para sul, contrapostos à estruturação NNW do Supergrupo Espinhaço subjacente.

A cobertura sedimentar representada pelo Grupo Una está deformada e descolada do embasamento, constituído pelo Supergrupo Espinhaço, caracterizando uma “tectônica pelicular” (thin-skinned), onde o embasamento não se encontra envolvido, concentrando-se a deformação na cobertura.

As unidades litoestratigráficas do Grupo Chapada Diamantina de idade paleo a mesoproterozoica, compõem o substrato da Bacia de Irecê sendo constituído por uma sequência predominantemente siliciclástica. Segundo Brito Neves & Leal (1968), esse grupo é constituído, da base para o topo, pelas formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu, das quais somente a última aflora na área de interesse.

O Grupo Una, de idade Neoproterozoica, foi depositado diretamente sobre os sedimentos do Supergrupo Espinhaço através de uma pronunciada discordância erosiva. Abrange as formações Bebedouro e Salitre, sendo essa última a principal formação aflorante na Bacia de Irecê.

A Formação Bebedouro (Oliveira & Leonardos, 1940), com espessura máxima estimada da ordem de uma centena de metros, aflora em faixas estreitas e descontínuas por mais de 400 km na direção N-S, ao longo dos flancos das grandes estruturas sinformais. Está assentada em discordância erosiva sobre rochas do Supergrupo Espinhaço e é recoberta em discordância erosiva pelas unidades carbonáticas da Formação Salitre. A primeira referência a essas rochas remonta ao final do século XIX, devida a Allen (1870) na "sub-bacia" Una-Utinga. O termo Formação Bebedouro, porém, só foi introduzido na literatura geológica em meados do século XX, por Oliveira & Leonardos (1940).

A Formação Salitre aflora extensivamente em toda a bacia e constitui uma espessa sucessão carbonática plataformal, localmente dolomitizada e com raras ocorrências terrígenas. Descrita primeiramente por Branner (1911) no vale do Rio Salitre, com a denominação de "Calcário Salitre", foi elevada à categoria de formação por Pedreira *et al* (1975), Misi & Souto (1975) e modificada por Misi (1976 e 1979). Posteriormente, Bonfim *et al* (1985) e Souza *et al* (1993) subdividiram informalmente essa formação em quatro unidades de litofácies carbonáticas e siliciclásticas, denominadas da base para o topo de Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê, limitadas entre si através de contatos gradacionais e interdigitados. Para a descrição será adotada a coluna estratigráfica proposta por Bonfim *et al* (1985), salientando-se que a unidade Gabriel não foi identificada na área em estudo.

Sobrepondo os calcários da Formação Salitre, ocorre a Formação Caatinga, descrita inicialmente por Branner (1911) nos vales dos rios Salitre e Jacaré. Diversos autores posteriormente descreveram os fósseis encontrados nas "tufas calcárias", interpretando-os como pertencentes ao calcário Caatinga, e atribuindo-lhes idades entre o Terciário e o Quaternário. Suguio *et al* (1980), através de estudos isotópicos, confirmaram que o calcário Caatinga foi gerado em ambiente de água doce. Penha (1994) descreve a presença de uma série de feições como gretas circungranulares, rizóides, tubos e moldes de raízes, sugestivas de processos pedogenéticos. Essa autora interpreta esses depósitos como sendo calcretes poligenéticos, compostos por calcrete pedogênico no topo e calcrete freático na base. Auler (1999) sugere que pode ser uma sequência palustre, na qual a oscilação do lençol freático expõe a unidade à ação de processos subaéreos.

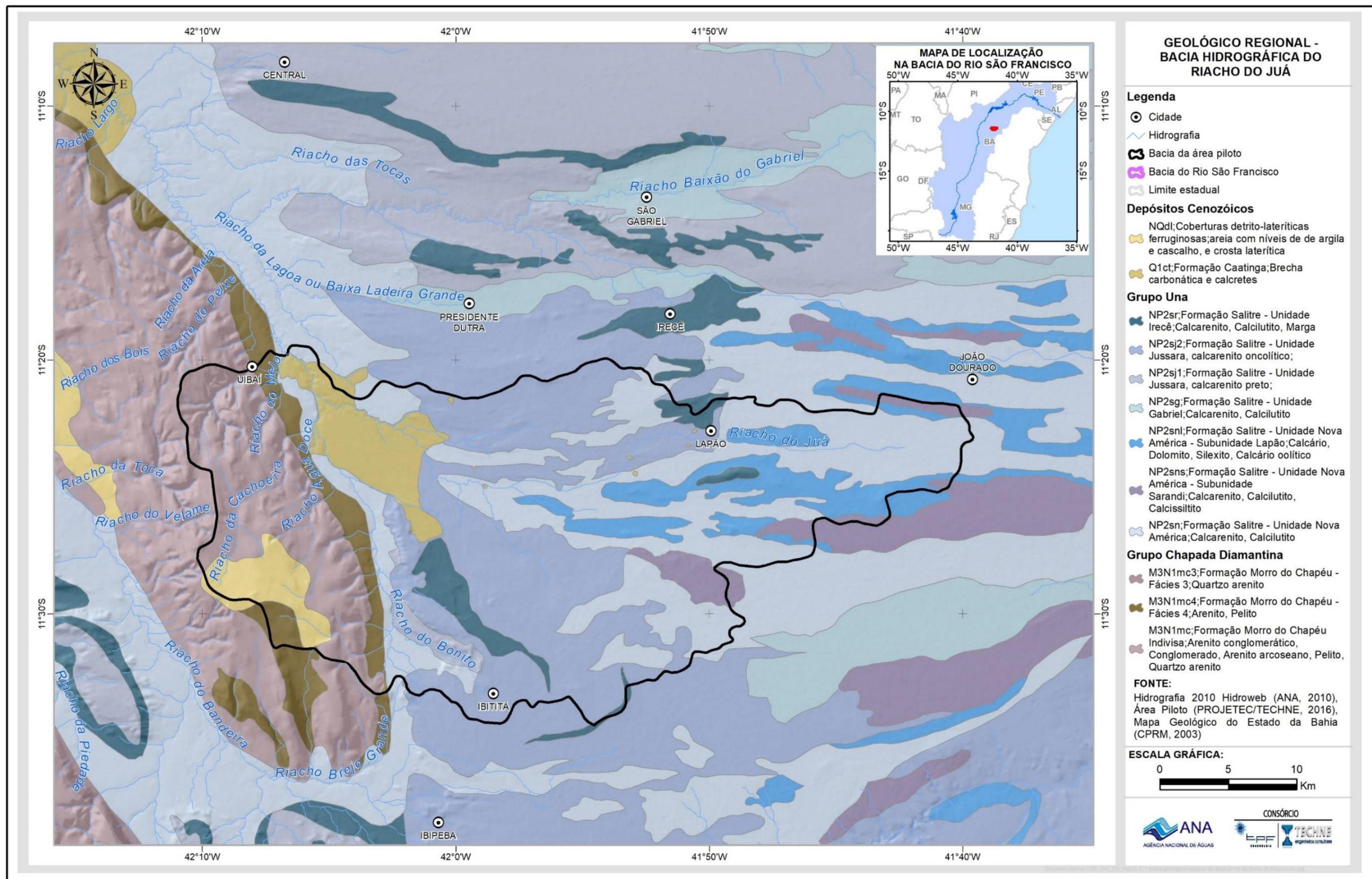


Figura 4.1: Mapa geológico regional da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

## 4.2 Geologia local

O mapeamento geológico da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá, na escala 1:50.000, foi baseado em critérios litológicos, estratigráficos e estruturais e é apresentado na Figura 4.2.

Obedecendo aos limites correspondentes à área piloto, foi realizado o trabalho de campo, cuja finalidade foi a identificação das unidades litoestratigráficas e caracterização estrutural da Formação Morro do Chapéu (Grupo Chapada Diamantina) e das formações Bebedouro e Salitre (Grupo Una), além das coberturas cenozoicas, tais como a Formação Caatinga.

A partir dos dados coletados, foi possível constatar que o padrão estrutural da região estudada está de acordo com os estudos anteriores realizados na área. A diferença na escala de deformação pode mudar com poucos metros, em que rochas pouco deformadas passam a ser intensamente deformadas (principalmente dobradas), caracterizando um padrão de deformação heterogêneo na região. A diferença de composição das rochas presentes é um fator importante a se considerar nesses diferentes graus de deformação.

As camadas de rochas carbonáticas da região possuem um padrão estrutural com mergulhos médios a altos para NW-NE que invertem para SW-SE, caracterizando um amplo sistema de dobramentos na região em escala centimétrica a quilométrica. Este sistema de dobramentos (D1) é caracterizado por dobras abertas a apertadas com planos axiais geralmente mergulhando com ângulos médios para norte (vergência para sul) e eixos mergulhando tanto para ENE como para WSW. Outra fase de deformação (D2) é caracterizada por movimentos transcorrentes com cinemática dextral, que geram dobras apertadas com eixos verticais. Estruturas rúpteis são comuns em toda a região e são caracterizadas por falhas e fraturas com direções preferenciais perpendiculares às direções das camadas.

Fica clara a relação geomorfológica entre as rochas do Grupo Chapada Diamantina (Formação Morro do Chapéu) e do Grupo Una. Os quartzitos alcançam cotas topográficas superiores a 1.000 metros, representados pela Serra do Uibaí no extremo oeste da área piloto, enquanto que os calcários encontram-se em cotas mais baixas, em torno de 800 metros no máximo.

Foram construídos cinco perfis litológico-estruturais mostrando as relações entre as unidades mapeadas (Anexo 3.8). A posição desses perfis é mostrada no mapa da Figura 4.2. A seleção dos cortes geológicos levou em conta o arranjo estrutural e sua elaboração levou em conta as informações de cerca de 217 afloramentos estudados no campo.

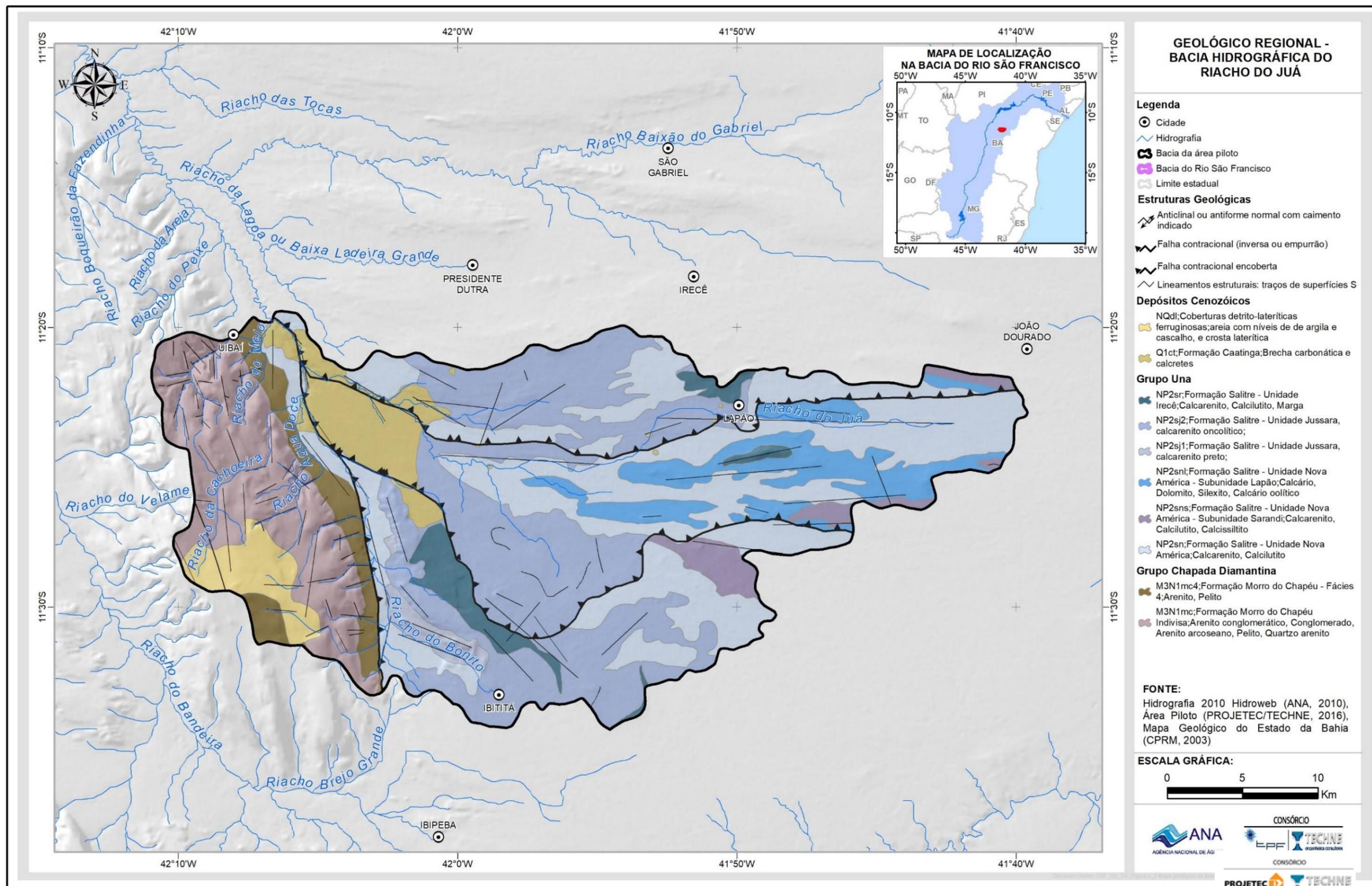
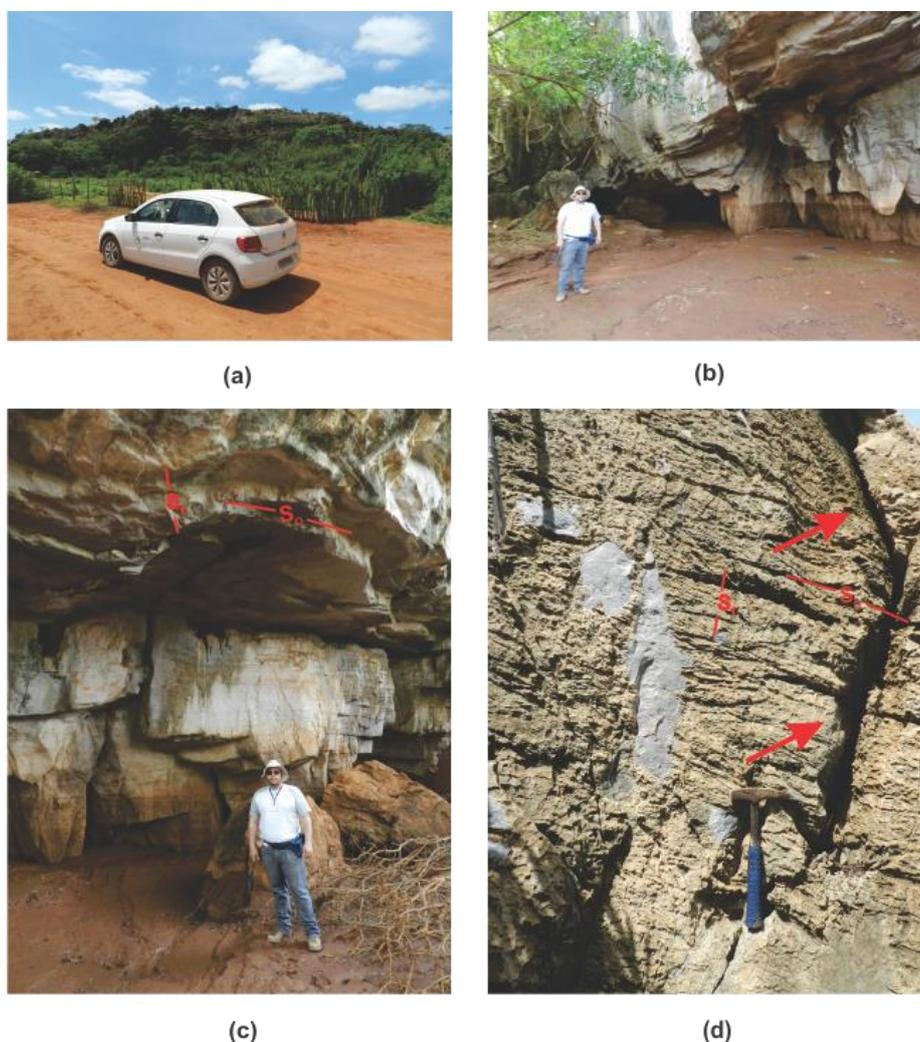


Figura 4.2: Mapa geológico da área piloto da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

## 4.2.1 Grupo Chapada Diamantina

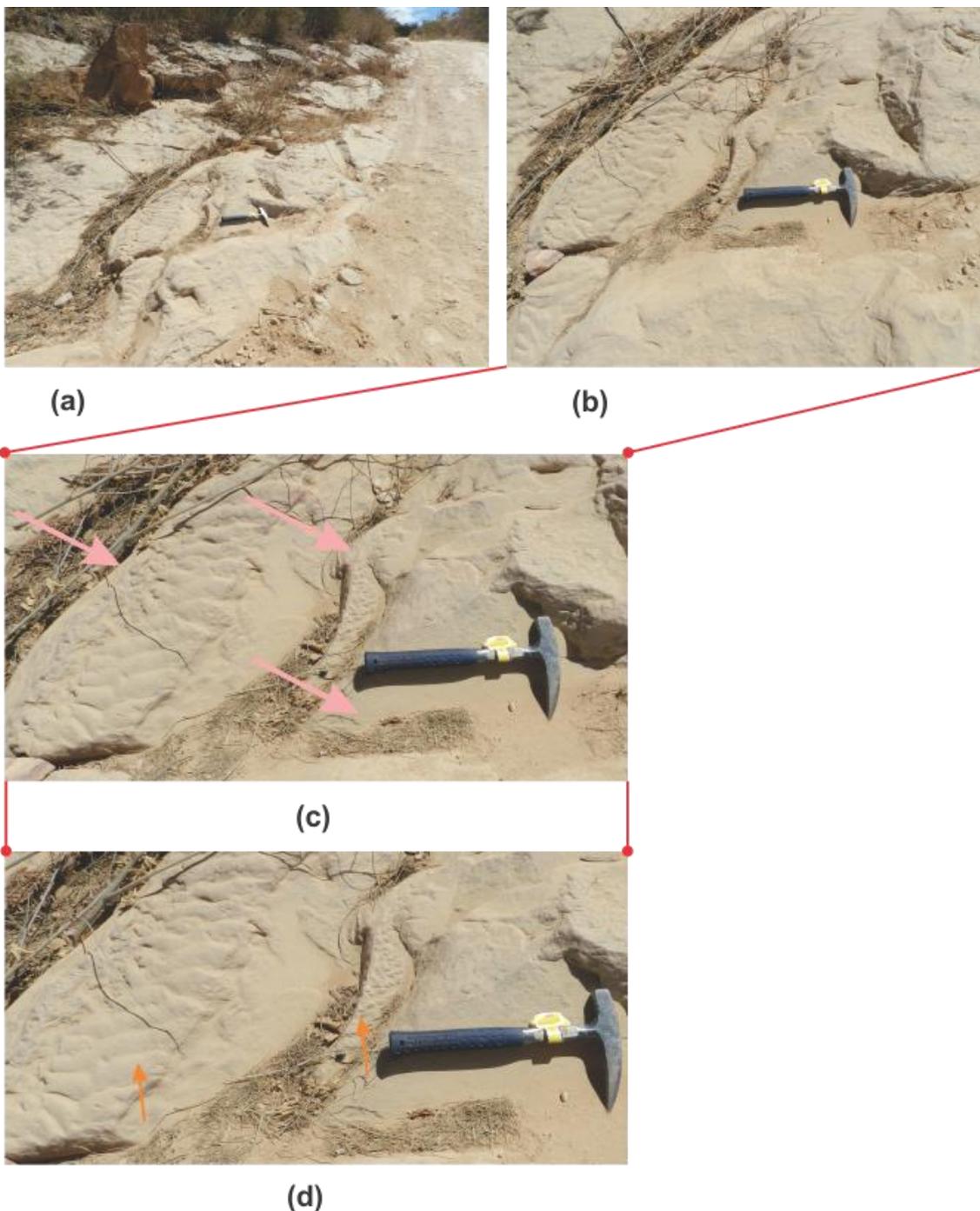
### 4.2.1.1 Formação Morro do Chapéu

Com sua exposição restrita ao extremo oeste da área de estudo, representando o embasamento onde estão assentadas as rochas carbonáticas da Formação Salitre, a Formação Morro do Chapéu engloba essencialmente quartzitos e arenitos. Macroscopicamente, essas rochas apresentam uma coloração esbranquiçada a alaranjada devido a manchas vermelhas disseminadas, compostas por óxido de ferro, por vezes acompanhando o acamamento. No extremo SW da área aflora o quartzito de coloração acinzentada contendo manchas avermelhadas devido à concentração de óxido de ferro (Figura 4.3). Com destaque na topografia, essa unidade aparece entre os municípios de Uibaí e Ibititá com orientação N-S.



**Figura 4.3: Grupo Chapada Diamantina - Formação Morro do Chapéu. Afloramento J-069, localizado no Povoado de Laranjeiras, município de Ibititá. (a) Vista geral; (b) Aberturas geradas pela interseção do acamamento com a direção de fraturamento; (c) Destaque para o S0 e S1 bem marcados, além de estratificações cruzadas e plano-paralelas; (d) As setas vermelhas mostram no topo da exposição de fraturas abertas.**

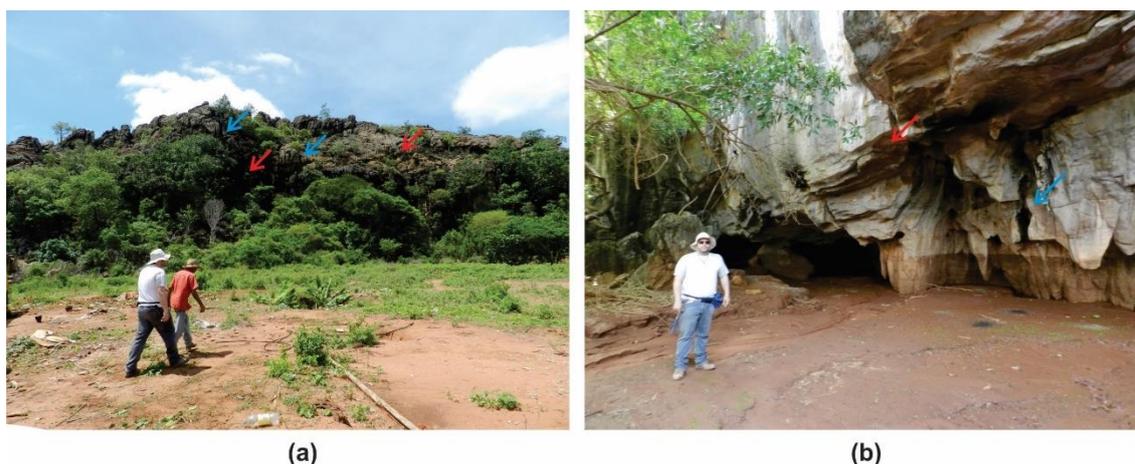
Os arenitos são arcossianos, bem selecionados, com matriz argilosa. Têm preservadas localmente, devido ao baixo grau de metamorfismo, estruturas sedimentares tais como estratificações plano-paralelas e cruzadas, além de marcas onduladas (Figura 4.4).



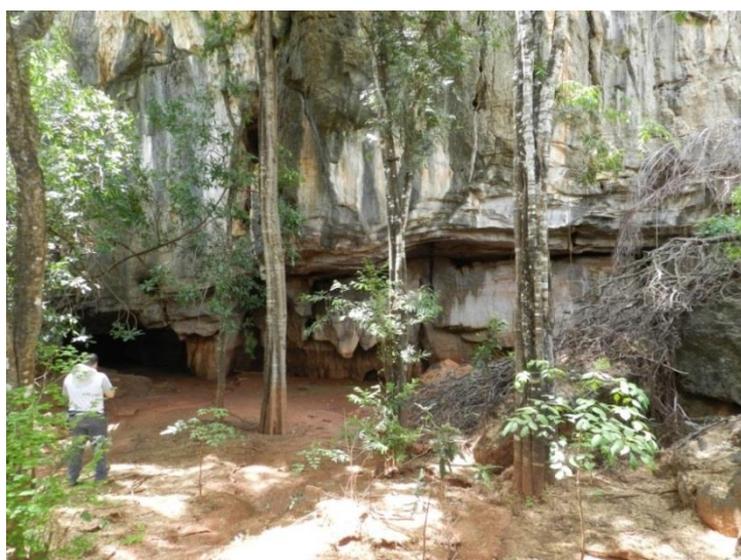
**Figura 4.4: Grupo Chapada Diamantina - Formação Morro do Chapéu. (a) Exposição localizada na Serra do Uibaí (Ponto J-020); (b) Destaque para o afloramento ilustrando o acamamento ainda preserva estruturas sedimentares; (c) Marcas onduladas do tipo linguóide com direção 280Az no topo da camada; (d) A seta laranja indica o paleofluxo.**

Os quartzitos e arenitos da Formação Morro do Chapéu constituem o substrato sobre o qual estão assentados os meta-sedimentos do Grupo Una, conforme será discutido adiante no item 5.1.3.1.

Nesta formação, no ponto J-069 (Figura 4.5), foi identificada uma feição exocárstica, mais especificamente uma caverna com um espaço aberto ao longo do acamamento de aproximadamente 5 metros de altura e com 15 metros de largura (Figura 4.6), localizada na região SW da área em discussão. Essa abertura está associada à interseção entre o acamamento com mergulho para E e falhas abertas de direção SE-NW e está localizada na Fazenda Morro da Carranca, Povoado de Laranjeiras – Ibititá/BA.



**Figura 4.5: (a) Vista geral do quartzito com destaque para a relação nítida entre o acamamento (setas vermelhas) e o fraturamento (setas azuis) além de feições como torres, típicas de rochas quartzíticas; (b) Detalhe ilustrando a relação entre o acamamento e falhas abertas.**



**Figura 4.6: Caverna presente no quartzito dentro da área de estudo.**

## 4.2.2 Grupo Una

Os carbonatos Neoproterozoicos da Chapada Diamantina Oriental foram separados do antigo Grupo Bambuí e individualizados sob a designação de Grupo Una, a partir da publicação do Mapa Geológico do Estado da Bahia, escala 1:1.000.000 (Inda & Barbosa, 1978). O Grupo Una se diferencia do Grupo Bambuí em dois importantes aspectos. Em primeiro lugar, ocorre de forma localizada, na Chapada Diamantina Oriental, sendo fisicamente separado do Grupo Bambuí por altos estruturais e topográficos do Supergrupo Espinhaço e do Arqueano (Figura 4.7). Em segundo lugar, exibe uma estratigrafia mais simples, com apenas as formações Bebedouro e Salitre. O Grupo Bambuí, por sua vez, ocorre numa vasta área, ocupando toda a região oeste da Bahia e a região oeste de Minas Gerais e apresentando uma estratigrafia mais rica com um máximo de cinco formações bem diferenciadas.

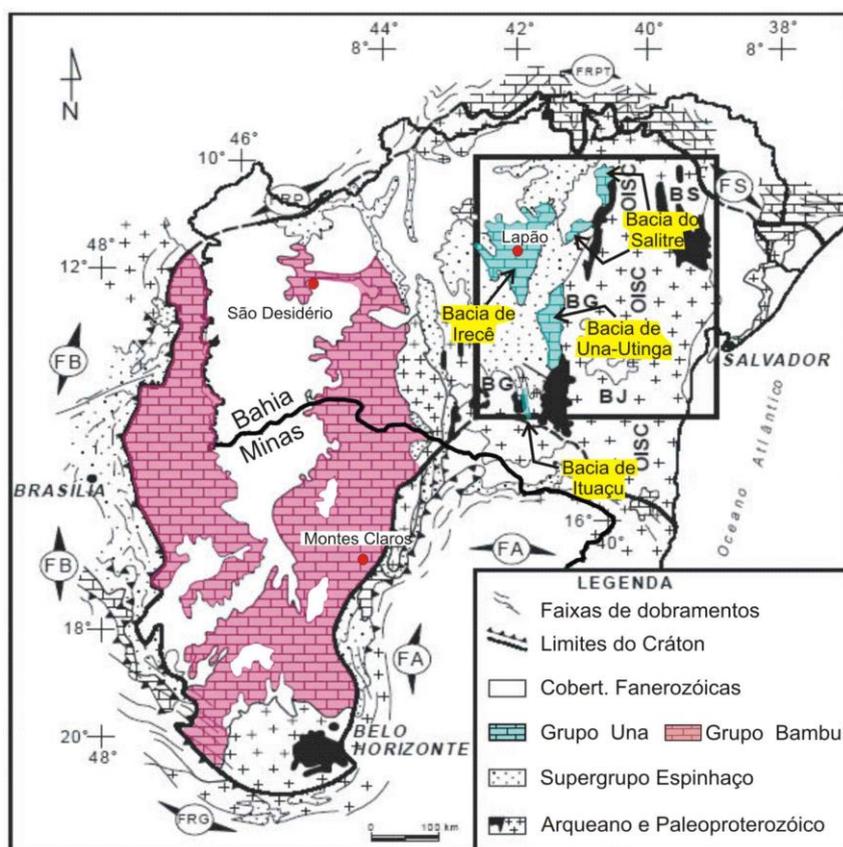
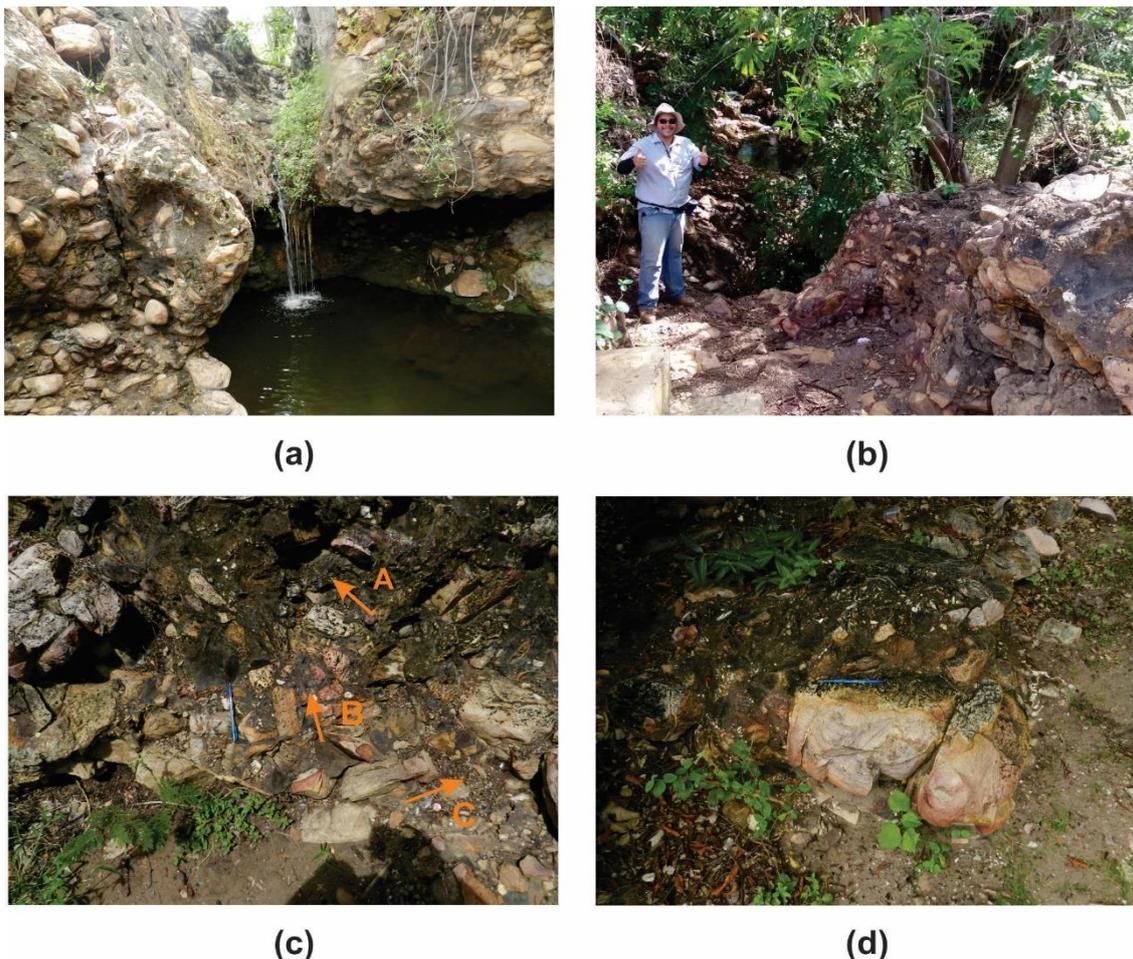


Figura 4.7: Área de ocorrência dos grupos Una e Bambuí. Adaptado de Barbosa *et al.* (2003).

#### 4.2.2.1 Formação Bebedouro

A Formação Bebedouro é constituída de depósitos rudáceos e representada no mapa da Figura 4.2 por uma faixa ao longo do contato com a Formação Morro do Chapéu, na borda W da área piloto. No entanto, um único afloramento dessa unidade litoestratigráfica foi identificado, no local conhecido como Cachoeira da Boca d'Água, no povoado homônimo. Esse afloramento (Ponto J-183) corresponde a uma ortobrecha monomíctica, maciça, onde os grãos apresentam formas que variam de alongada a achatada, muito angulares, com limites facetados, constituído por fragmentos de quartzito. A rocha é mal selecionada, com cimento silicoso de coloração avermelhada (Figura 4.8).



**Figura 4.8: Formação Bebedouro, Ponto J-183 - Cachoeira de Boca D'água. (a) Vista da corrida de água que na época de seca tem sua vazão reduzida devido aos baixos índices pluviométricos da região; (b) Vista de um ponto na periferia da cachoeira, a cerca de 20 metros; (c) Detalhe ilustrando o arcabouço da rocha com orientação preferencial dos clastos; (d) Exibição de um bloco de quartzito em meio à clastos e grãos de mesma composição ilustrando a má seleção.**

#### 4.2.2.2 Formação Salitre

Pedreira *et al* (1993) propuseram para a Formação Salitre quatro ciclos sedimentares que se alternam em função de pulsações de um mar Neoproterozoico, conforme mostrado na Figura 4.9.

CICLOS		FÁCIES
IV	TRANSGRESSIVO	IRECÊ
		JUSSARA Superior
III	REGRESSIVO	JUSSARA Inferior
		SARANDI
		NOVA AMÉRICA Superior
		IRECÊ
II	TRANSGRESSIVO	NOVA AMÉRICA Inferior
		JUSSARA Superior
I	REGRESSIVO	IRECÊ
		NOVA AMÉRICA Superior
		NOVA AMÉRICA Inferior

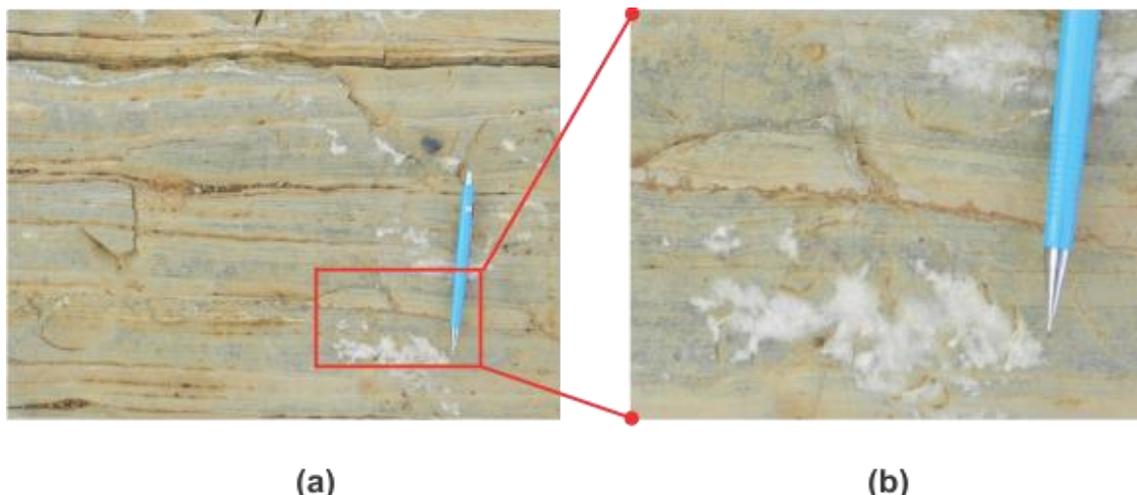
Figura 4.9: Fácies da Formação Salitre. Adaptado de Pedreira *et al* (1993).

#### 4.2.2.2.1 Unidade Nova América

Essa unidade litoestratigráfica tem ocorrência significativa na porção NNE a centro norte da área de estudo, que vai do povoado de Gameleira (município de João Dourado) até as imediações do município de Lapão. A SSW tem sua ocorrência mais restrita, em contato com a Formação Morro do Chapéu.

É composta quase que totalmente por ritmitos carbonáticos representados por intercalações entre laminitos algais e calcilitos. Essa alternância aparece como laminações, com espessuras que variam de milímetros a centímetros. Apresenta coloração cinza claro com tons mais escuros e, por vezes, com intercalações de películas avermelhadas de silixito (Ponto J-001). Os calcilitos com laminação plano-paralela de espessura milimétrica são restritos ao centro norte da área, apresentando-se com coloração cinza escura e contendo intercalações de níveis arenosos de coloração cinza mais clara a esbranquiçada, cuja granulometria é mais arenosa.

No ponto J-163, os níveis de calcisiltos cinza escuros predominam, com intercalações de calcarenitos finos de coloração mais clara. Esses níveis apresentam espessuras em torno dos dois centímetros e são levemente ondulados, principalmente na transição entre os litotipos. Localmente apresentam superfícies crenuladas (estiliolitos) coincidentes com os planos de acamamento, provavelmente geradas pela compactação vertical exercida pelo peso das lâminas subjacentes (Figura 4.10). Os afloramentos costumam ser na maior parte bem extensos, com dimensões de 150 a 451 metros aproximadamente.



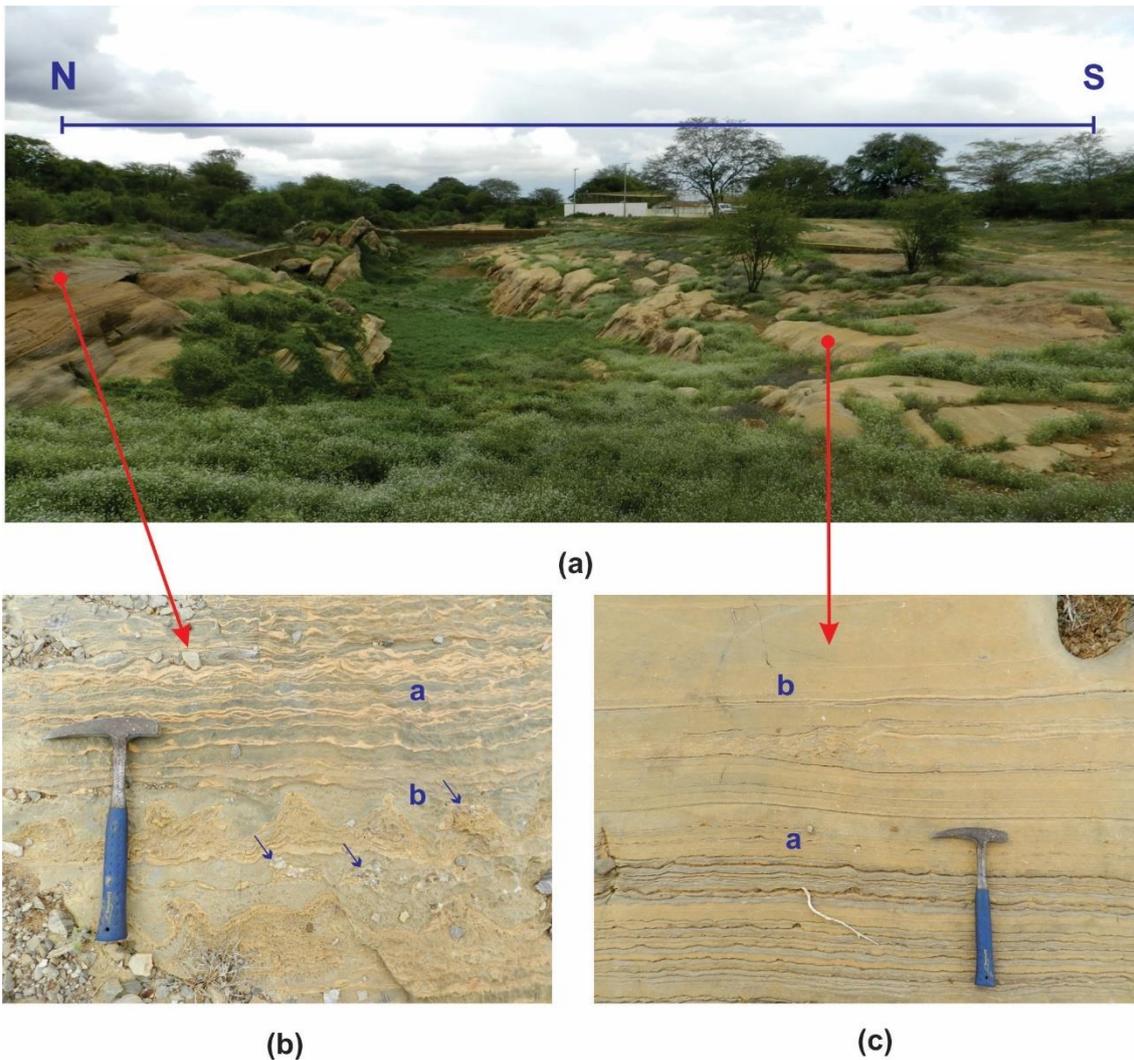
**Figura 4.10: Unidade Nova América, Ponto J-163. Representação de uma das exposições da unidade Nova América, localizada no município de Lapão, às margens da BA-432, sentido município de Canarana. (a) Intercalação de calcisiltitos de coloração cinza com calcarenitos finos de coloração clara (b) Destaque para as superfícies crenuladas em padrão de ziguezague geradas pela dissolução das duas superfícies acima e abaixo coincidindo com os planos de acamamento.**

O ponto J-161 é um exemplo das exposições dos litotipos da Unidade Nova América. Aparecem como corpos extensos e alongados de relevo aplainado. Na porção norte, predominam as intercalações entre lamitos cinza escuro e calcarenitos finos de coloração esbranquiçada. Já na parte Sul, há uma ocorrência maior de calcisiltitos de coloração cinza claro com laminação plano-paralela, intercalados com calcarenitos finos de coloração esbranquiçada.

As estruturas sedimentares presentes, tais como os tepees<sup>2</sup> que caracterizam a Unidade Nova América, ocorrem principalmente nos lamitos cinza escuro. Estruturas convolutas compostas por calcarenitos finos de coloração creme se sobrepõem aos lamitos cinza escuro e enfatizam as concentrações de sílexito concordantes com o acamamento (Figura 4.11).

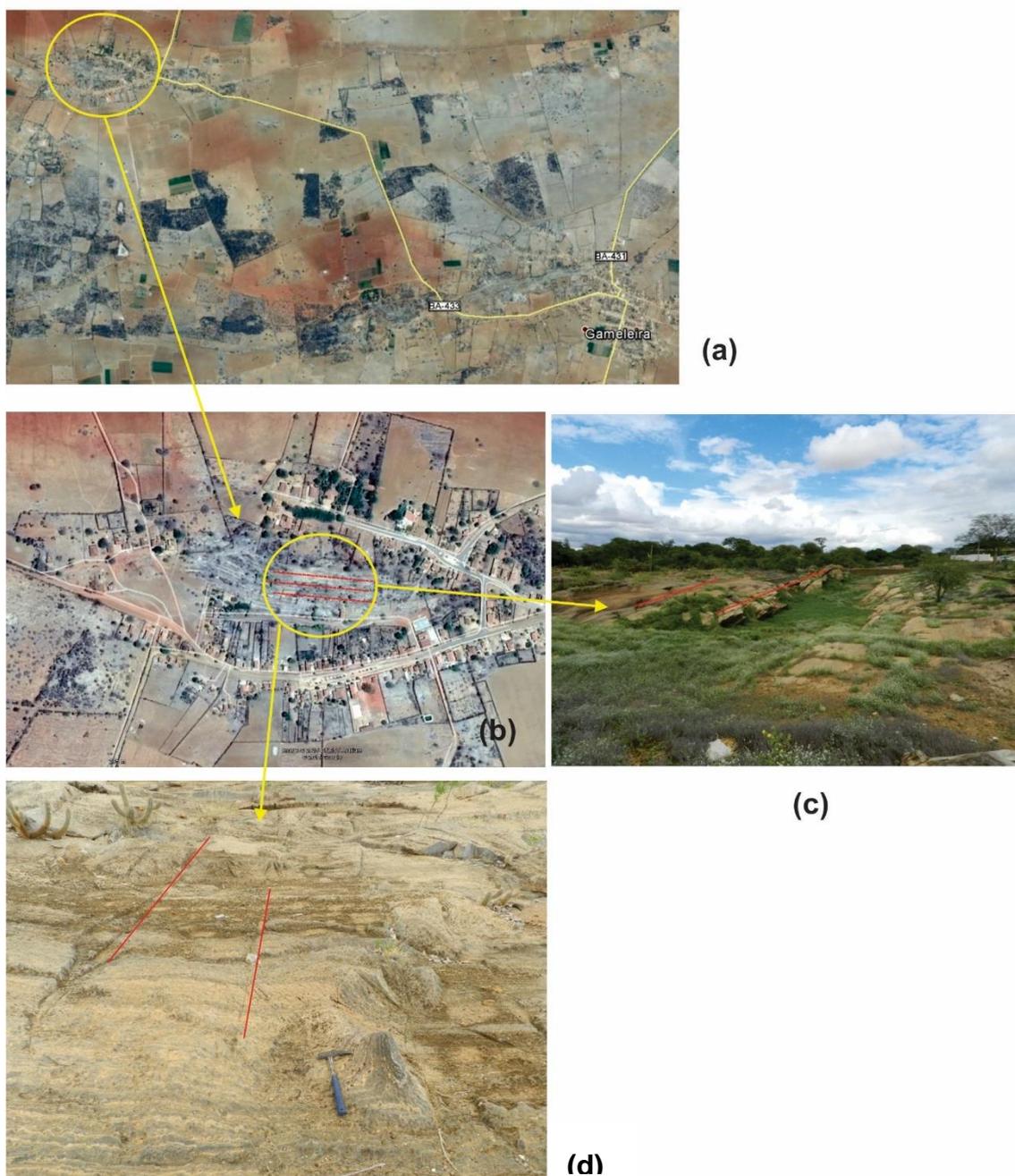
---

<sup>2</sup> Estrutura em forma de tenda dos índios norteamericanos



**Figura 4.11: Unidade Nova América. (a) Ponto J-161; (b) Estruturas convolutas e tepees; (c) Detalhe de a para b: lamito cinza escuro ondulado intercalando com calcissiltitos cinza claro com laminação estrutura plano-paralela a homogêneo com níveis milimétricos de calcarenitos finos de coloração esbranquiçada.**

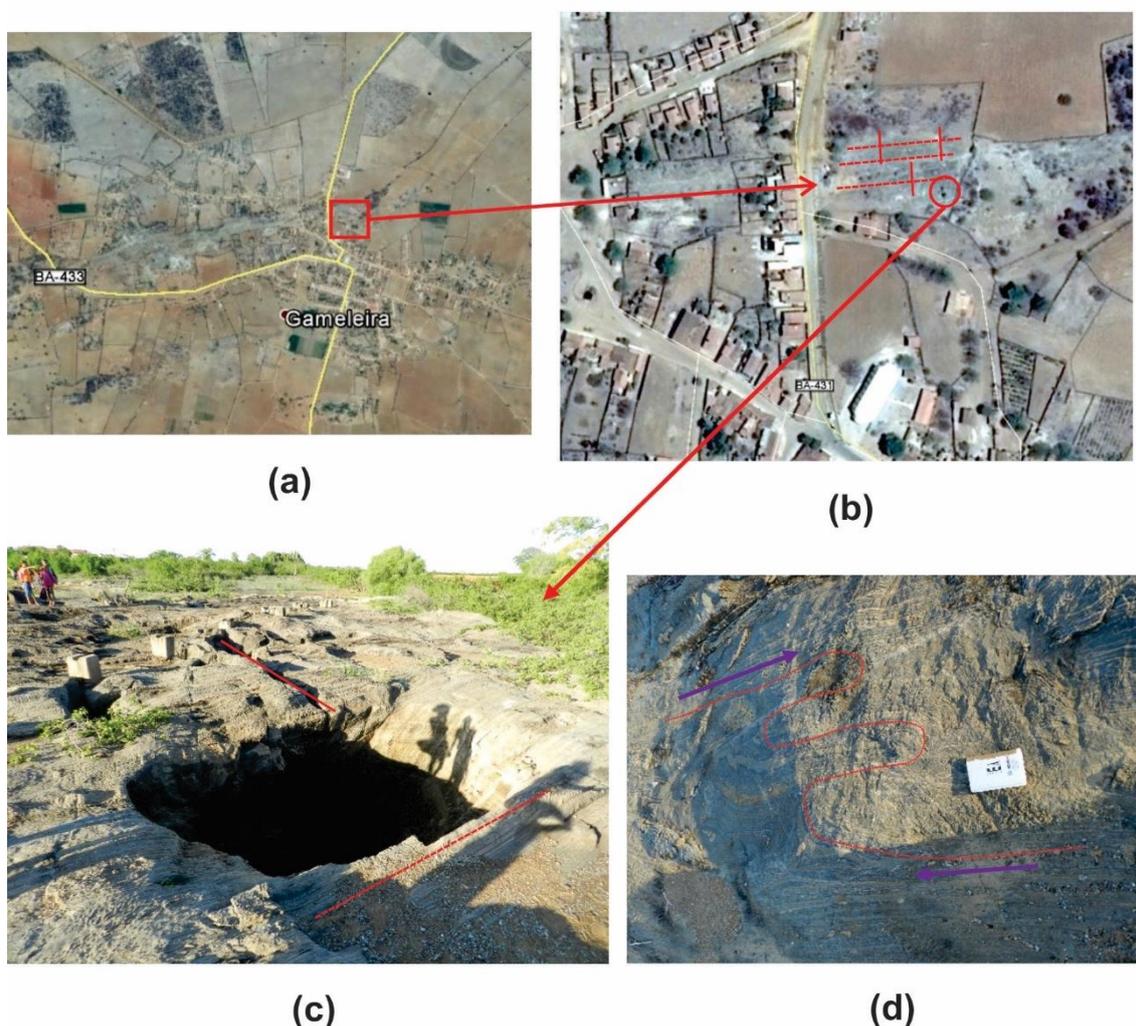
Nesse afloramento (J-161), as camadas possuem um mergulho uniforme para NNE com valores próximos a 50°. Fraturas perpendiculares à direção das camadas são comuns e por vezes evoluem para fraturas abertas (Figura 4.12).



**Figura 4.12: Unidade Nova América, Ponto J-161. (a) Localização do afloramento nas imediações do Povoado de Conquista, município de João Dourado. (b) Detalhe mostrando a extensão do afloramento; (c) Feições de dissolução ao longo do acamamento; (d) Fotografias do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho para NNE e as falhas perpendiculares.**

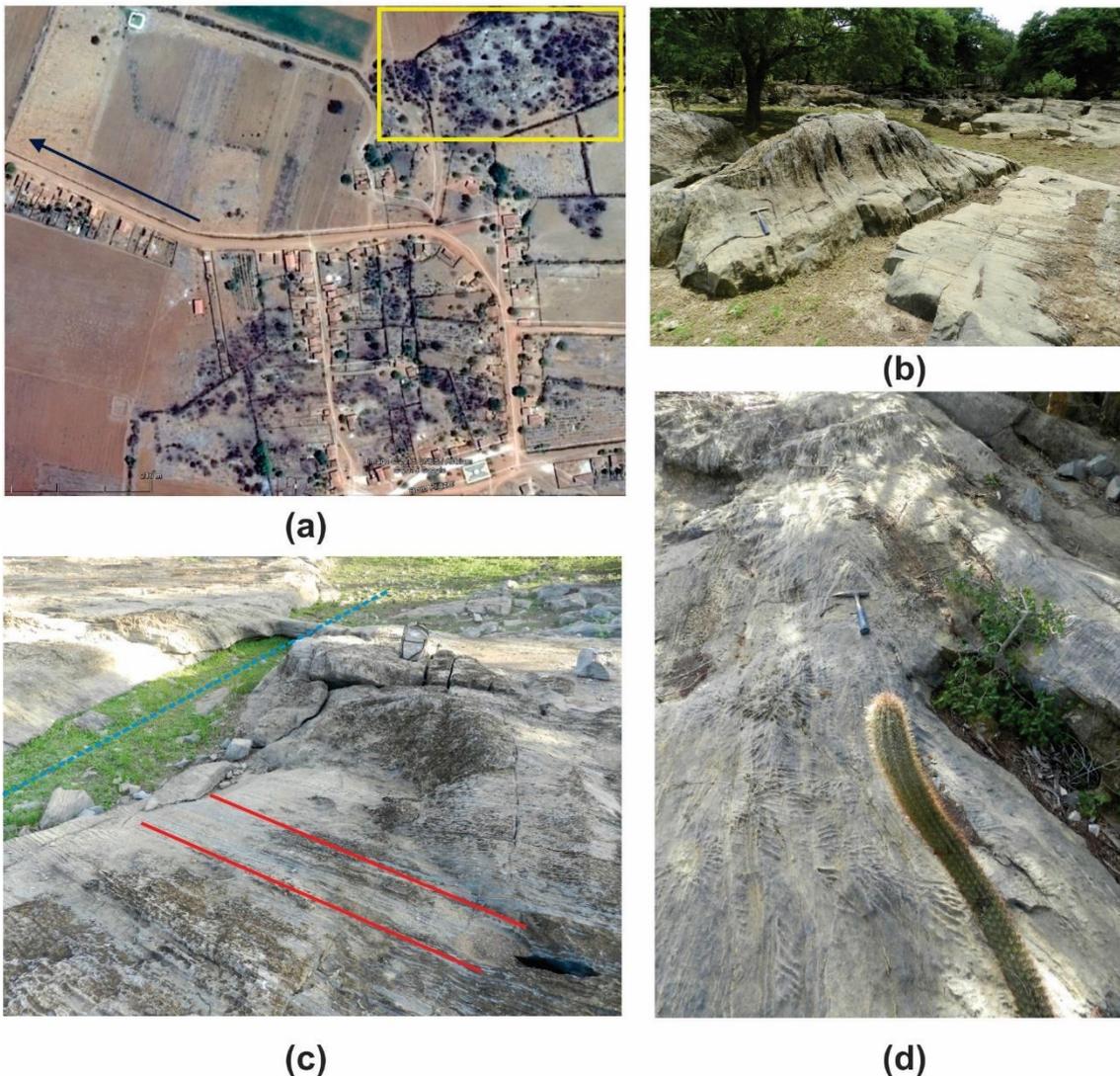
Os lamitos algais de coloração cinza escuro, que se intercalam com os calcarenitos finos de coloração esbranquiçada, observados no ponto J-048, ao contrário do afloramento anterior, não apresentam níveis de sílexito na transição dos litotipos. As camadas mergulham com ângulos em torno de  $70^\circ$  para NNW e por vezes se apresentam dobradas, evidenciando uma transpressão dextral. Falhas ou fraturas perpendiculares à direção das

camadas são comuns e por vezes evoluem para fraturas abertas formando os sumidouros (Figura 4.13).



**Figura 4.13: Unidade Nova América, Ponto J-048. (a) Localização do afloramento no Povoado de Gameleira, Município de João Dourado; (b) Detalhe do afloramento J-048; (c) Fotografia do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho para NNW (linhas vermelhas tracejadas) e as falhas perpendiculares (linhas vermelhas contínuas); (d) Camadas dobradas (linhas vermelhas finas tracejadas) indicando um movimento transpressional dextral – setas roxas.**

O afloramento J-165 é caracterizado por dobras sinclinais e anticlinais, abertas a apertadas, com planos axiais concordantes com a direção preferencial das camadas. Essas camadas seguem o padrão da região (ENE), exibindo mergulhos variando de 40° a 50° para NW. Esses mergulhos podem chegar a algo em torno de 80° e até inverter para SE, próximo às dobras. Falhas e fraturas perpendiculares à direção das camadas são comuns (Figura 4.14).



**Figura 4.14: Unidade Nova América, Ponto J-165. (a) Localização do afloramento no Povoado de Bom Prazer, Município de Lapão. (b) Fotografia do afloramento mostrando a direção das camadas com mergulho preferencial para NW; (c) Inversão do mergulho das camadas para SE e fraturas perpendiculares à direção das camadas; (d) Dobra apertada afetando as camadas de rochas (detalhe no martelo).**

#### 4.2.2.2.2 Unidade Jussara

A Unidade Jussara aflora na região centro oeste e sudoeste da área de estudo, sob a forma de corpos alongados e de geometria sigmoidal, arranjados segundo a orientação EW. Bonfim *et al* (1985) a separam em três subunidades distintas, levando em conta a variação litológica e de ambiente sedimentar, distinguindo da base para o topo: Jussara inferior, Jussara médio e Jussara Superior.

A subunidade Jussara Inferior é constituída por calcarenitos, calcilutitos e calcissiltitos, além de termos terrígenos representados por arenitos arcossianos, siltitos e pelitos. Na subunidade Jussara Médio predominam calcarenitos finos odorosos, calcissiltitos e calcilutitos de coloração cinza a preta, caracterizados

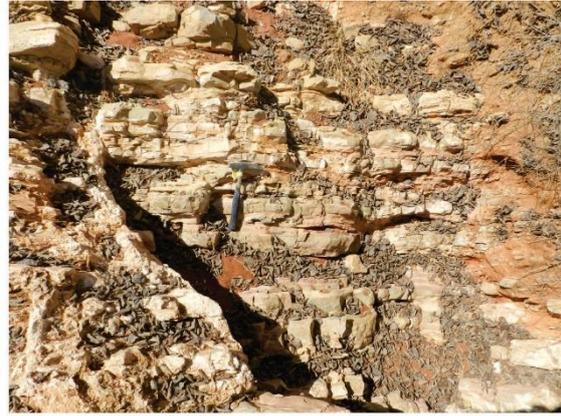
por apresentarem finas placas que não ultrapassam 10 cm de espessura, separadas por filmes de argila ou marga, intemperizados e invariavelmente de cor avermelhada. Também são característicos da subunidade, bancos com espessura máxima de um metro, por vezes maciços internamente, outras vezes laminados e/ou finamente estratificados. Por fim, a Subunidade Jussara Superior apresenta como tipo característico um calcarenito oncolítico intraclástico de coloração cinza escura a preta, interacamadado e interlaminado com calcilitos e calcissilitos de mesma coloração.

Levando em conta essas definições, na área de estudo foram identificados apenas os litotipos correspondentes às subunidades Jussara Superior e Inferior. Essa última, identificada nos pontos J-016 e J-081, apresenta-se como siltitos de coloração creme-esverdeada e pelitos contendo calcarenitos cinza-médio e siltitos, com mergulho baixo a médio variando entre 8° (Ponto J-079) e 64° (J-016). Já os litotipos correspondentes à Subunidade Jussara Superior, predominantes na área de estudo, são calcarenitos a calcissilitos, por vezes com gradação inversa ascendente, em alguns pontos (J-118), e com coloração variando entre cinza médio a escuro (J-108).

As exposições mais extensas territorialmente da Unidade Jussara estão localizadas no extremo SW da área. O grande problema dos litotipos envolvidos nessa unidade é a não exposição de estruturas sedimentares preservadas, apesar de Bonfim *et al* (1985) chamarem atenção para a ocorrência de estruturas plano-paralelas e cruzadas. Outra particularidade é a ocorrência de trombolitos (ponto J-091), que correspondem a bioconstruções de textura coagulada (clotted) maciça e dômica, interpretadas como de origem microbial (Terra *et al*, 2010), encontradas no ponto J-091. Possuem uma coloração cinza-escuro com estruturas que se assemelham a filamentos verticais em perfil, e aparência grumosa em planta, onde não são observadas laminações internas. Apresentam um odor característico de H<sub>2</sub>S quando quebradas em fratura fresca (Figura 4.15).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

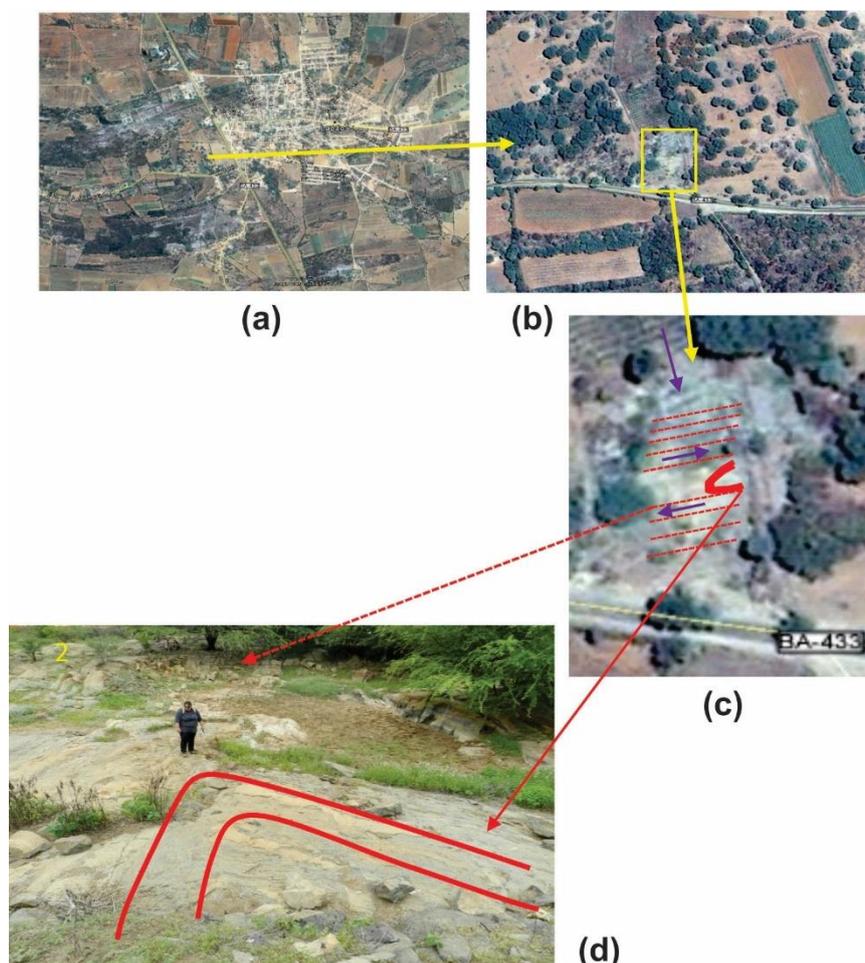


(f)

**Figura 4.15: Unidade Jussara e os litotipos identificados. (a) Siltito identificado no ponto J-054, porção SW da área estudada; (b) Sequência composta por siltito, argilito avermelhado e calcissiltito descrito no ponto J-016, na estrada que liga os municípios de Uibaí e Ibititá, margem direita; (c) Ponto J-095, calcarenito cinza médio contendo nódulos espaciaçados, concordantes com o acamamento; (d) Ponto J-107, calcarenitos cinza escuro contendo veios de calcita e localmente, contendo níveis com pirita; (e) e (f) Ponto J-091, trombólitos.**

No Ponto J-086, essas rochas formam uma dobra suave com ângulos de mergulho variando de  $8^\circ$  e flancos mergulhando para ENE e WSW. Esse afloramento encontra-se na borda SE da área de estudo, como ilustrado no Perfil C-C' (ANEXO 3.8), em que dominam mergulhos suaves das camadas, principalmente nos siltitos do ponto J-081, cujo mergulho é de  $8^\circ$ . As rochas possuem falhas abertas de diversos tamanhos com direções variando entre NNW e NNE e fraturas preenchidas com direções variando entre ENE e WSW (Figura 4.17).

No Ponto J-159, as rochas se dispõem em camadas alternadas, com mergulho alto ( $68^\circ$  a  $84^\circ$ ) preferencialmente para NNW. Em certo ponto do afloramento, é possível identificar uma dobra com plano axial NE-SW onde um dos flancos mergulha para NW. A presença dessa dobra indica que além do empurrão para sul característico de toda a bacia, houve também movimentos laterais em que as camadas se deslocaram de WSW para ENE – transpressão dextral (Figura 4.16).



**Figura 4.16: Unidade Jussara, Ponto J-159. (a) Localização do afloramento em Lapão; (b) Retângulo amarelo indicando o afloramento; (c) Estruturação do afloramento. Linhas tracejadas – camadas com mergulho para NW, linhas contínuas – dobra, setas roxas – sentido dos movimentos tectônicos; (d) Reconstituição da dobra em escala de afloramento.**



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.17: Unidade Jussara, Ponto J-086. (a) Limite do “Domo de Ibititá” (circulo amarelo tracejado) e a localização do afloramento em discussão; (b) Padrão de Falhamento NNE e ESE (setas tracejadas vermelhas); (c) e (d) Feição de dissolução denominada “tanque”.**

#### 4.2.2.2.3 Unidade Irecê

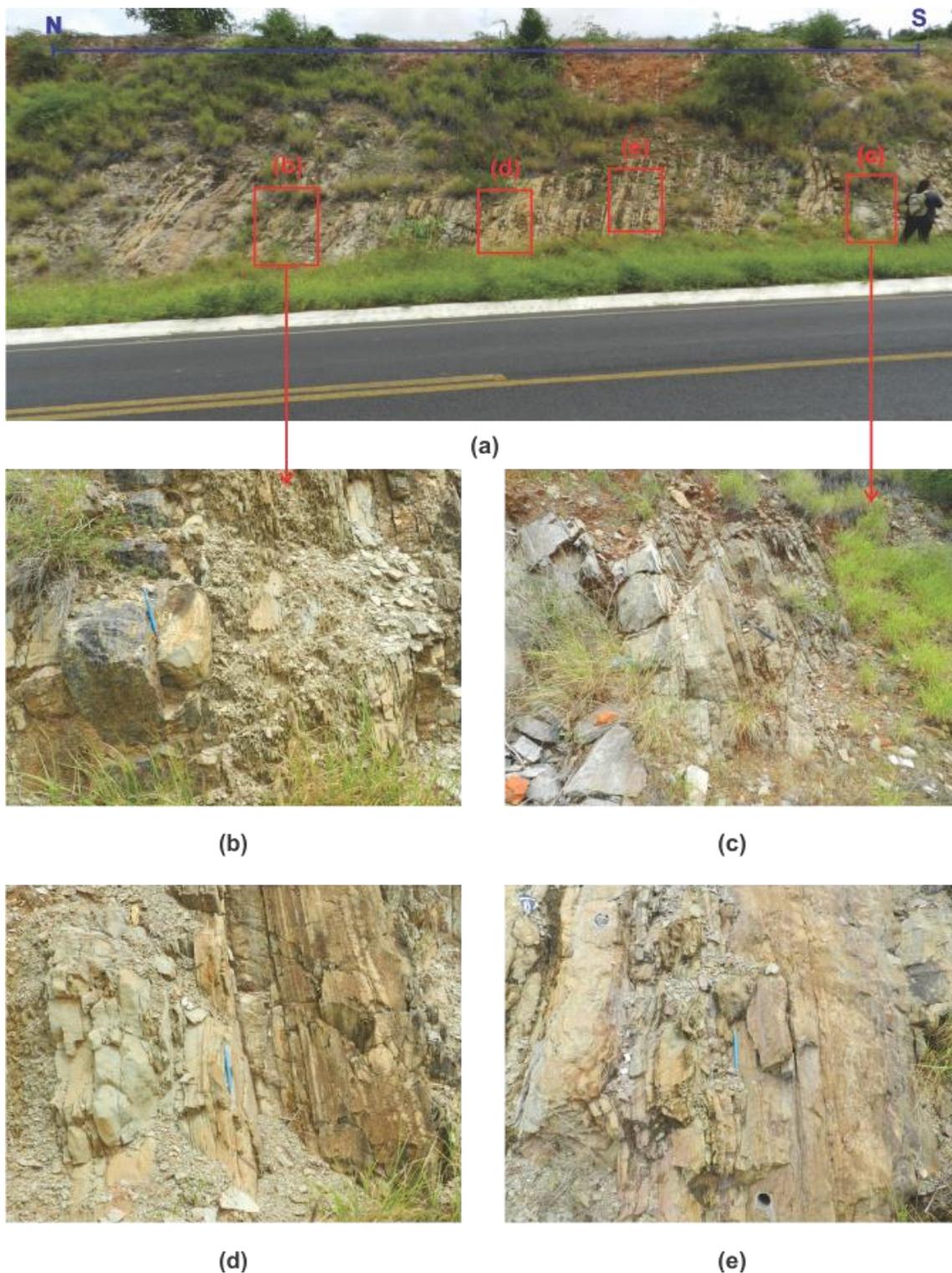
Essa unidade é descrita na região norte do município de Lapão. Seu contato principal se faz com os litotipos pertencentes à Unidade Jussara, conforme ilustrado no perfil geológico B-B' (ANEXO 3.8). É composta predominantemente por calcilutitos laminados, com variação gradativa para calcarenitos de coloração cinza escuro associados a margas, além de uma sequência pelítica composta por siltitos de coloração esverdeada, argilitos vermelhos e sílex cinza escuro. Arenitos com granulação média a fina aparecem como intercalações de espessuras centimétricas nos pelitos (Figura 4.18).



**Figura 4.18: Unidade Irecê Ponto J-166. Calcarenitos de cor cinza médio, intercalados com níveis margosos, localizados no centro urbano do município de Lapão, próximo ao cemitério municipal. (a) Extensão da área aflorante; (b) Destaque para o tipo de ocorrência espaçada devido à variação da espessura do solo, bem comum para os calcários desta unidade.**



**Figura 4.19: Unidade Irecê, Ponto J-181. Exposição localizada próximo ao ponto anterior.**



**Figura 4.20: Unidade Irecê, Ponto J-160. (a). Vista geral da exposição localizada as margens da BA432, município de Lapão; (b) Sílex de coloração cinza escuro associado siltitos de coloração cinza-esverdeado; (c) Calcarenito cinza médio; (d) e (e) Final da sequência pelítica com destaque para o argilito de coloração avermelhada.**

### 4.2.2.3 Formação Caatinga

Ocorrendo em quase toda a área de estudo, a Formação Caatinga tem sua ocorrência mais expressiva a NW da área de interesse, no município de Uibaí, às margens da rodovia BA-052 e ao longo da rodovia BA-434 até o município de Ibititá (Figuras 4.21 e 4.22).

Ocorre sobre os calcários da Formação Salitre, principalmente na borda W e no centro da área de estudo, nos municípios de Uibaí e Lapão, às margens da BA-432, apresentando dois litotipos. O primeiro litotipo é de calcários puros, heterogêneos e pulverulentos de coloração esbranquiçada, apresentando uma camada fina de solo amarronzado a avermelhado de granulometria argilosa (Figura 4.21).



**Figura 4.21: Formação Caatinga conforme observada durante o levantamento de campo. a) Exposição em uma estrada vicinal que liga o município de Uibaí ao Povoado de Poço pela Avenida Central (J-154). b) Detalhe marcado na foto a) ilustrando o aspecto opaco e a coloração branca característica.**



**Figura 4.22: Formação Caatinga. Ponto J-007, afloramento as margens da BA432 margem esquerda no sentido Uibaí-Ibititá. Feições de dissolução com preenchimento de solo cujo recobrimento é raso.**

Um segundo litotipo é uma rocha tipo calcrete. Trata-se de um material de cor bege, bem cimentado, englobando, por vezes, pequenos fragmentos de rochas carbonáticas pertencentes à Formação Salitre. Reage muito bem ao HCl diluído a frio.

Os pontos visitados (Figuras 4.23 e 4.24) são restritos a cortes de estrada ou vias de acesso secundário (vicinais). Auler (1999) sugere que o calcário Caatinga possa ser uma sequência palustre, na qual a oscilação do lençol freático expõe a unidade à ação de processos subaéreos. Essa unidade litoestratigráfica também aflora preenchendo fissuras em acamamentos ou fraturas das rochas carbonáticas da Formação Salitre.



**Figura 4.23: Formação Caatinga. Afloramento localizado (J-150) numa estrada vicinal que dá acesso ao Povoado Matinha de Brito no município de Presidente Dutra. A Formação Caatinga como calcrete.**



(a)



(b)

**Figura 4.24: Vista de uma das formas de ocorrência da Formação Caatinga. (a) ocorre preenchendo fraturas e acamamento na Formação Salitre como calcrete; (b) Preenchendo fraturas perpendiculares e sobrepondo parcialmente.**

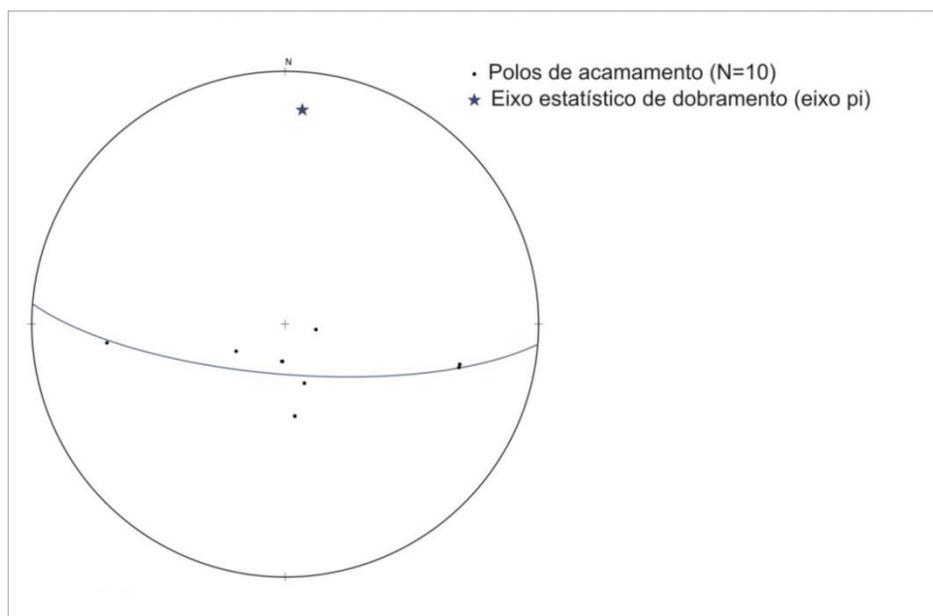
#### 4.2.2.4 Análise dos dobramentos

Na análise dos dobramentos da área piloto da Bacia do Riacho do Juá foram identificados pelo menos três domínios estruturais distintos: (1) domínio estrutural do Supergrupo Espinhaço na porção oeste da área; (2) domínio estrutural E do Grupo Una, englobando a porção central e leste da área piloto, onde predomina o dobramento de direção EW; e (3) domínio estrutural W do Grupo Una, onde a estruturação EW parece estar afetada por uma deflexão para NNW, próximo ao contato com o Supergrupo Espinhaço.

##### 4.2.2.4.1 Domínio estrutural 1 – Supergrupo Espinhaço

Caracteriza-se pela estruturação NS, representado por um anticlinório com eixo médio nessa direção, com as rochas do Supergrupo Espinhaço no seu núcleo, ladeadas pelas rochas do Grupo Una nas suas bordas. Trata-se da Serra do Uibaí onde afloram os quartzitos e arenitos da Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina do Supergrupo Espinhaço.

O estereograma da Figura 4.25 abaixo mostra polos de acamamento sedimentar medidos neste domínio. Configuram uma guirlanda da qual se infere um dobramento aberto com eixo médio em torno de 005/17 (caimento de 17° para N005E).



**Figura 4.25: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar no Supergrupo Espinhaço (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).**

##### 4.2.2.4.2 Domínio estrutural 2 – Domínio E do Grupo Una

A porção central e leste da área piloto, incluída aqui no Domínio E do Grupo Una, caracteriza-se pela disposição E-W predominante das estruturas geológicas.

Observa-se em afloramento e mapa um sistema predominante de dobramentos com eixos E-W e plano-axiais empinados mergulhando para norte (Figura 4.26).



**Figura 4.26: Ponto J-008 - calcissiltitos pertencentes à Unidade Jussara. Dobras abertas a fechadas, com eixo EW horizontal e plano axial com mergulho forte para N.**

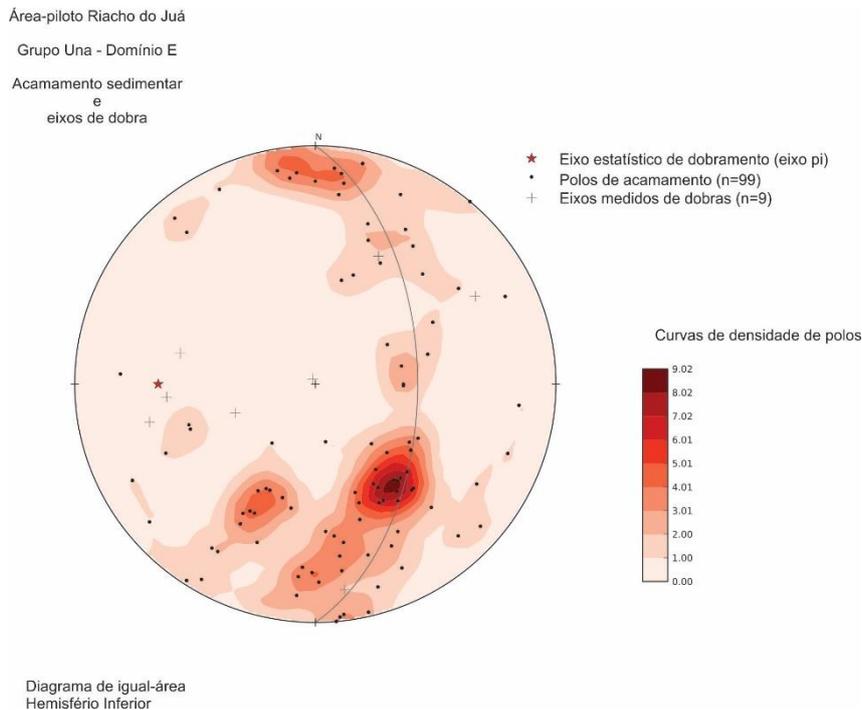
O estereograma da Figura 4.27 mostra os polos de acamamentos medidos nesse domínio. Observa-se uma razoável dispersão dos dados, mas com a sugestão de uma guirlanda indicando eixo médio de dobramento em torno de 285/35 (caimento de 35° para N085W). Esta atitude média coincide aproximadamente com parte dos eixos de dobra medidos no campo.

A concentração máxima de medidas de acamamento indica um plano médio por volta de N050E/45NW.

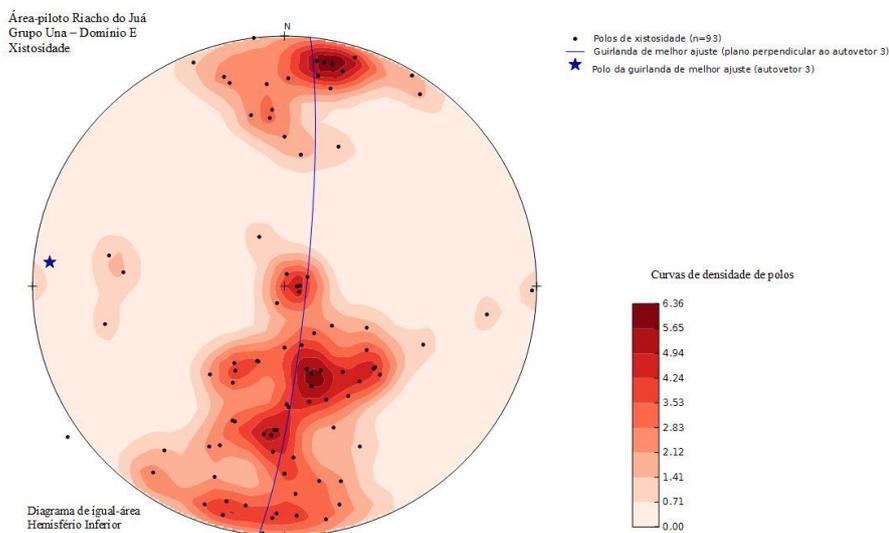
Nesse mesmo estereograma nota-se uma possível guirlanda com eixo médio em torno de caimento 30° para N010E. A dispersão de dados e a sugestão de duas guirlandas aproximadamente ortogonais entre si é consistente com uma sobreposição de dobramentos, com eixos aproximadamente EW e NNW, gerando figuras de interferência tipo “caixa de ovos”, por vezes observadas em afloramento (Figura 4.29).

Os dados de clivagem (xistosidade) plano-axial (Figura 4.28) também sugerem uma guirlanda, com eixo médio de dobramento em torno de EW horizontal.

Essa disposição em guirlanda da atitude da clivagem tectônica (xistosidade) pode sugerir tanto um redobramento em laço, também com eixos EW sub-horizontais, como uma disposição em leque da clivagem tectônica com relação ao plano-axial do dobramento.



**Figura 4.27: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar e eixos de dobra no Domínio E do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).**



**Figura 4.28: Estereograma mostrando os polos de clivagem (xistosidade) no Domínio E do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).**

Nesse domínio estrutural são também observados em campo sistemas conjugados de veios sigmoidais mostrando uma compressão máxima em torno de NS horizontal, compatível com o dobramento de eixos por EW sub-horizontais.

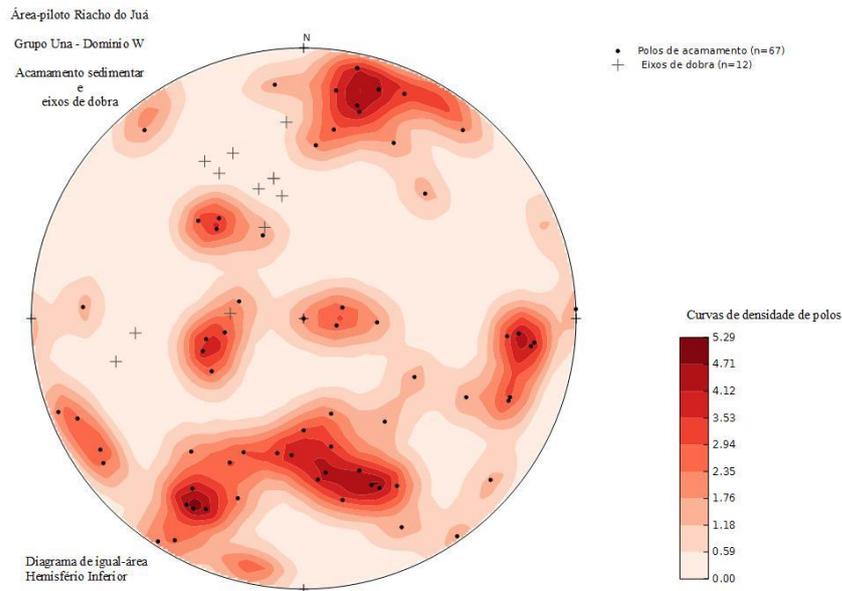


**Figura 4.29: Possível figura de interferência de dobramentos, tipo “caixa de ovos”, em ritmitos da Unidade Nova América (Ponto J-001).**

#### **4.2.2.4.3 Domínio estrutural 3 – Domínio W do Grupo Una**

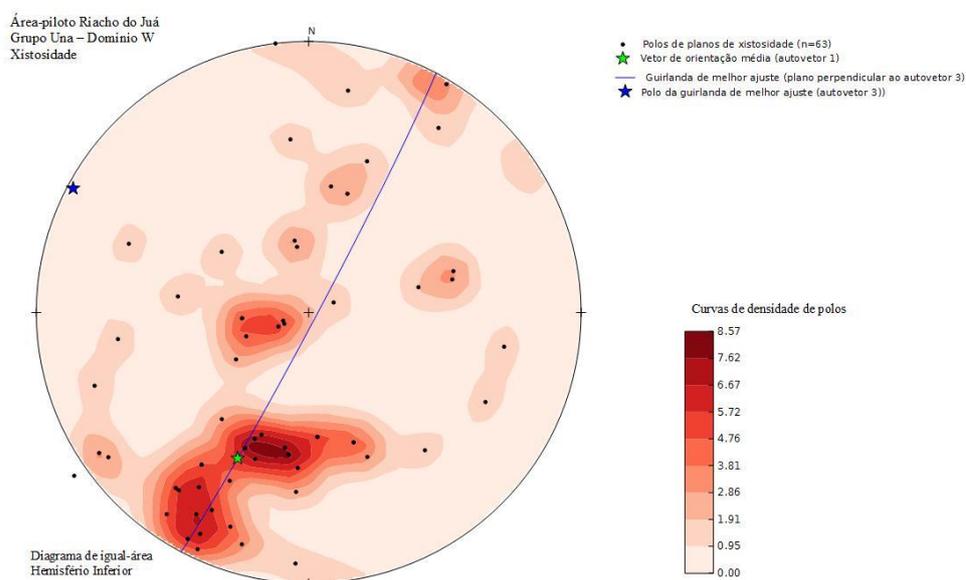
No Domínio W do Grupo Una, situado entre o domínio do Supergrupo Espinhaço e a porção central da área piloto, a estruturação EW deste Grupo é defletida para NNW (ver mapa da Figura 3.4), provavelmente devido ao transporte tectônico do Supergrupo Espinhaço de norte para sul, que teria “arrastado” consigo as estruturas da cobertura (Grupo Una).

O padrão de distribuição dos polos de acamamento neste domínio estrutural (Figura 4.30) mostra uma forte dispersão, possivelmente devido à sobreposição de dobramentos e deformações. Os eixos de dobra mostram uma variação de W para N, podendo representar uma sobreposição de dobramentos, mas talvez mais provavelmente a deflexão das estruturas junto ao contato com o Supergrupo Espinhaço.



**Figura 4.30: Estereograma mostrando os polos de acamamento sedimentar no Domínio W do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).**

Os polos das clivagens tectônicas tomadas neste domínio (Figura 4.31) mostram uma configuração mais interpretável, sugerindo uma guirlanda indicando um eixo médio de dobramento 300/00 (N60W horizontal) e um plano médio 015/44 (N075W/44NE), mais uma vez compatível com a deflexão de EW para NW das estruturas da cobertura junto ao contato com o Supergupo Espinhaço.



**Figura 4.31: Estereograma mostrando os polos de clivagem (xistosidade) no Domínio W do Grupo Una (Diagrama de Schmidt-Lambert, hemisfério inferior).**

#### 4.2.2.5 Análise dos fraturamentos

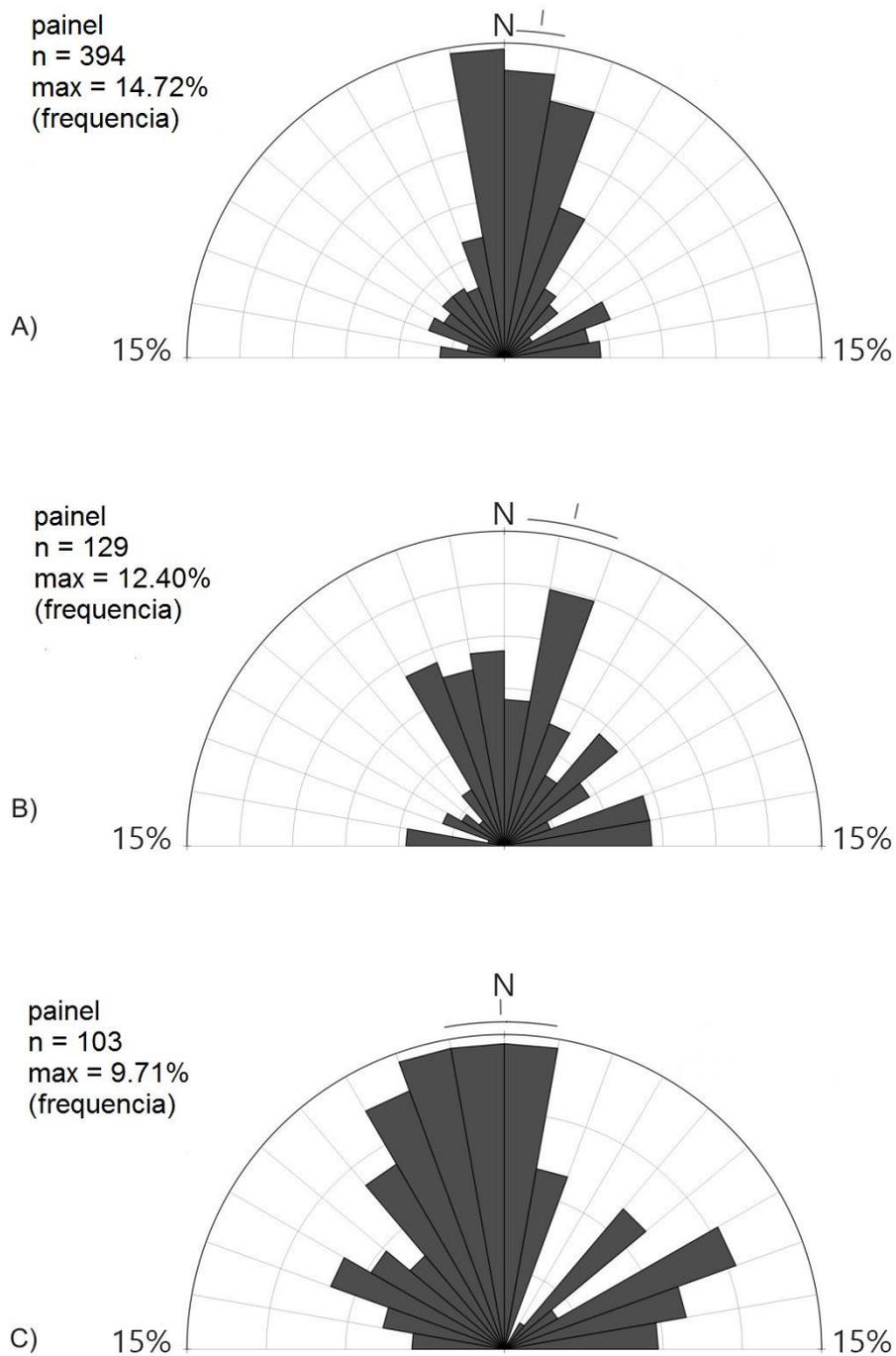
A distribuição das direções de fraturas na área piloto (Figura 4.32) mostra uma forte orientação preferencial em torno da direção N-S. Essa orientação preferencial é mais proeminente no Domínio E do Grupo Una e menos nos domínios W do Grupo Una e no Espinhaço. Ocorrem outras famílias com orientação E-W, NE-SW e NW-SE.

Provavelmente um fator controlador importante para a orientação dos fraturamentos é a anisotropia do maciço. Sendo as direções estruturais (acamamento, xistosidade, dobras) E-W, há uma tendência de que os planos de fratura ocorram paralelamente às estruturas do maciço (E-W) ou perpendiculares a ela (N-S). Isso é mais notório no Domínio E do Grupo Una (Figura 4.32-A), onde as direções E-W são mais marcantes. Já no Espinhaço, com direções estruturais principais em torno de NNW-SSE (Figura 4.32-C), o fraturamento desenvolve-se preferencialmente nas direções NNW-SSE ou NNE-SSW.

O fraturamento N-S também pode ser interpretado como fraturas distensionais, associadas a um esforço compressivo máximo ( $\sigma_1$ ) N-S, evidenciado pelos eixos de dobramento alinhados aproximadamente E-W, sistemas de veios sigmoidais e transporte tectônico de N para S, nas rochas do Grupo Una.

O desenvolvimento dos sistemas cársticos nos calcários do Grupo Una dá-se preferencialmente na direção E-W, condicionado pelas discontinuidades das estruturas principais do maciço (acamamento, xistosidade, dobras), e na direção a ela perpendicular, N-S, condicionado pelo fraturamento mais visível.

Em imagem de satélite observa-se um predomínio de lineamentos E-W nas porções leste e central da área piloto, nos calcários da Formação Salitre (Figura 4.33). Na porção oeste dessa área, nas rochas do Grupo Chapada Diamantina do Supergrupo Espinhaço (Formação Morro do Chapéu), predominam os lineamentos NW-SE e, subordinadamente, NE-SW.



**Figura 4.32: Diagrama rosácea mostrando a direção de fraturas medidas no campo: A) Domínio E do Grupo Una; B) Domínio W do Grupo Una; C) Domínio do Supergrupo Espinhaço.**

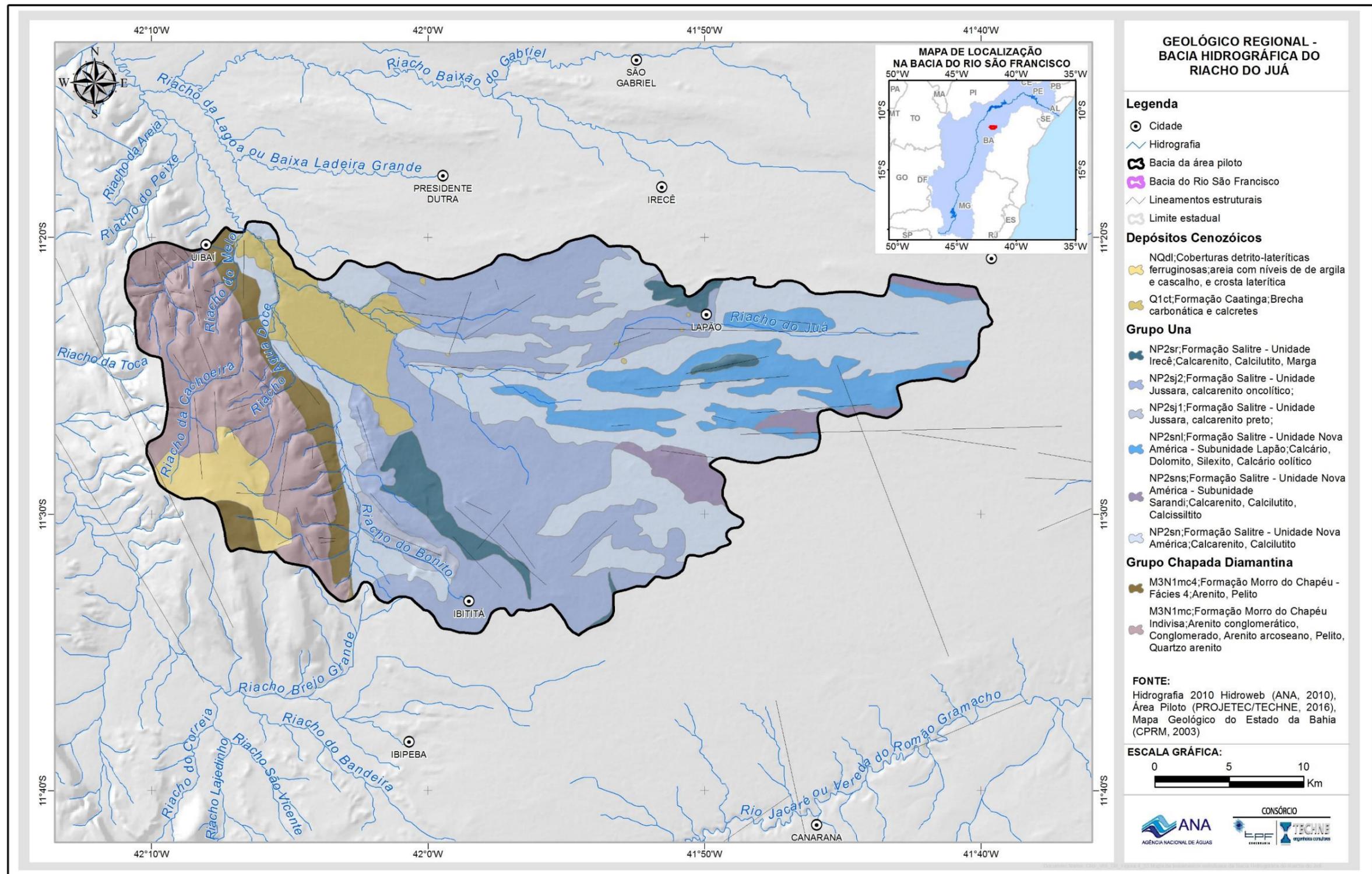


Figura 4.33: Mapa de lineamentos estruturais da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

#### 4.2.2.6 Feições cársticas e as litologias da Formação Salitre

A variedade litoestratigráfica apresentada pela Formação Salitre em conjunto com o padrão estrutural encontrado na Bacia de Irecê foi de suma importância para o desenvolvimento de uma geomorfologia cárstica tão particular. Mesmo obedecendo às condições definidas para a diferenciação dessas feições, uma mesma morfologia apresentou uma aparência distinta, que foram as aberturas concordantes ao acamamento que funcionam como sumidouros ou surgências temporárias.

Nos processos de carstificação dessa região, a preexistência de fraturas é mais importante do que a porosidade primária, uma vez que a dissolução promovida pela água ácida é mais intensa em locais onde ela pode se concentrar e agir sobre porções maiores de rocha. Estruturas como planos de acamamento e de falhas, diaclases, fendas e fraturas permitem o desenvolvimento de rotas preferenciais para a condução da água meteórica ácida, que ocasionam a expansão desses espaços, tornando-os aos poucos em galerias e salões.

Esses processos de dissolução estão registrados, principalmente, nas unidades Nova América e Jussara. Na região leste da área de interesse a ocorrência de sumidouros é mais expressiva, com destaque para os municípios de João Dourado e Lapão, cujas exposições dos ritmitos pertencentes à Unidade Nova América, tem sua maior ocorrência espacial. Para a porção oeste, onde há um predomínio da Unidade Jussara, as feições cársticas mais comuns são as correspondentes a aberturas ao longo do plano de acamamento que, por vezes, são circulares nas bordas, gerando uma morfologia alongada por conta da interseção com fraturas ou juntas. Outras feições tais como lapiás, cavernas e dolinas são menos comuns.

Embora o relevo cárstico esteja associado preferencialmente às rochas calcárias, há paisagens semelhantes em outras rochas que não sejam de composição calcária. Atualmente existe uma tendência para incluir as rochas silicatadas, particularmente os quartzitos e arenitos, no grupo das rochas carstificáveis. Esta propensão, registrada em Gillieson (1996), deriva de demonstrações de que a dissolução da sílica, anteriormente considerada de baixa solubilidade, tem tido um papel importante na configuração de morfologias superficiais e subterrâneas tipicamente cársticas. Bons exemplos da ação efetiva desses processos podem ser observados no Parque Estadual do Ibitipoca/MG (Corrêa-Neto *et al*, 1993). Na área de estudo, foi observado esse processo nos quartzitos da Formação Morro do Chapéu, no município de Ibititá/BA.

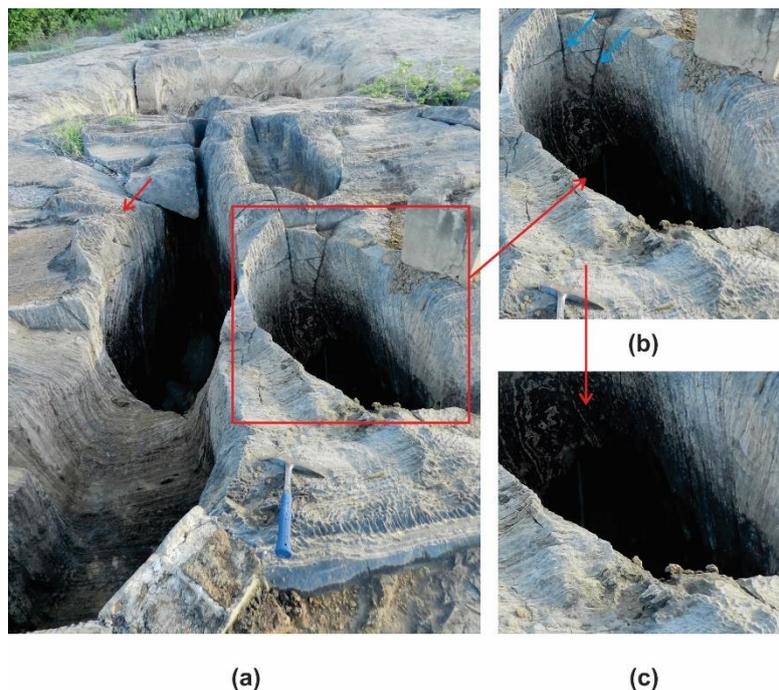
As feições cársticas identificadas na área de estudo foram separadas em feições superficiais (exocarstes) e feições subterrâneas (endocarstes), que serão descritas separadamente.

#### 4.2.2.6.1 Feições subterrâneas: endocarstes

Para Bögli (1980), o endocarste corresponde à zona do carste composta pelos condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. Segundo Ford e Williams (2007), o principal aspecto de controle da gênese das cavernas está condicionado à atitude estrutural da rocha e sua relação geográfica entre a área de recarga e de descarga hídrica.

As cavernas são formadas em zonas vadasas, intermediárias (ou de oscilação) ou freáticas (WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007; PALMER, 2009). A zona vadosa caracteriza-se por apresentar condições de livre circulação de água e, geralmente, é formada por condutos entrincheirados (PALMER, 2000). A formação dessa zona está associada à circulação da água ao longo das falhas e fraturas por ação da gravidade, e esse fato condiciona o alargamento e coalescência dos espaços vazios, isto é, condiciona o aumento da porosidade secundária.

Nos ritmitos pertencentes à Unidade Nova América, pequenas cavernas e dutos subterrâneos, não foram comumente observados, ficando estas feições restritas apenas aos pontos J-048 e J-165. Em feições alongadas (que serão discutidas mais adiante), os dutos subterrâneos (restritos ao ponto J-048) apresentam uma direção preferencial N-S e NE-SW sendo a primeira mais comum (Figura 4.34).



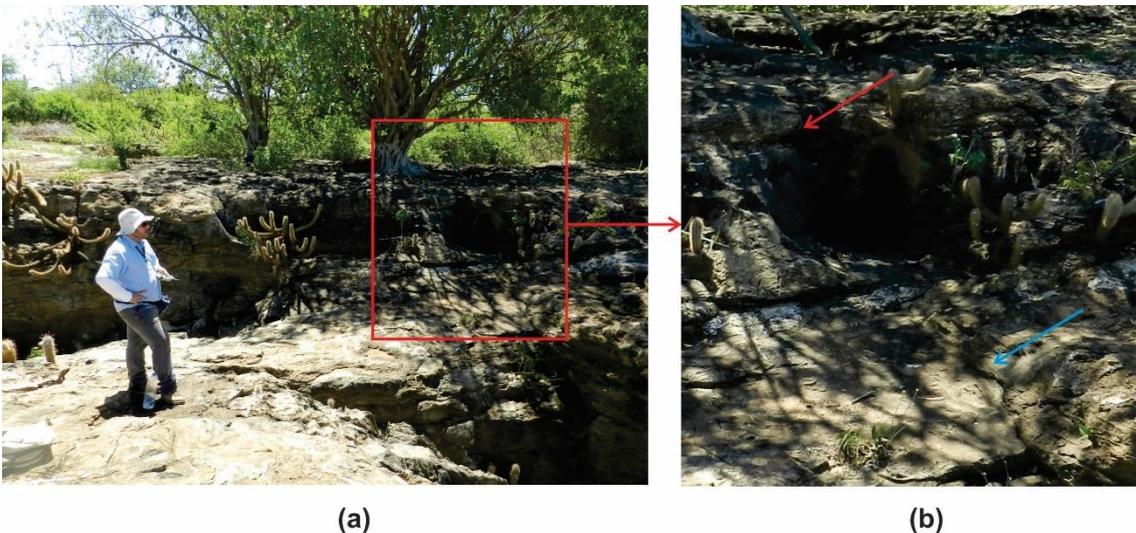
**Figura 4.34: Ponto J-048. (a) Dutos subterrâneos associados com sumidouros; (b) Setas azuis indicam as fraturas e a vermelha o acamamento; (c) Duto subterrâneo.**

Cavernas não são muito comuns nessa unidade. Em Lapão, na Fazenda Lajedo, localizada no Povoado de Bom Prazer, a Figura 4.35 mostra a única ocorrência observada durante o levantamento de campo.



**Figura 4.35: Duto e Caverna na região central na área de estudo (Ponto J-165). (a) Duto; (b) Caverna.**

Nos calcarenitos da Unidade Jussara, dutos aparecem como uma feição de dissolução nas interseções entre as fraturas, cuja direção NNE-SSW e NW-SE, perpendiculares à direção dos planos de acamamento E-W (Figura 4.36). Sua geometria é arredondada, porém alongada na direção preferencial NNW-SSE. Estes dutos mostram o início do processo de dissolução que responde por fraturas abertas (ou fendas) concordantes ao acamamento imitadas por fraturas (popularmente conhecidas como “tanques”).



**Figura 4.36: Ponto J-086. (a) Dutos superficiais alinhados com respeito ao comprimento longitudinal, com o acamamento e verticalmente com fraturas abertas; (b) Detalhe ilustrando a relação entre o acamamento (seta vermelha) e fraturas (seta azul).**

Feições do tipo sumidouro (Figuras 4.37 e 4.38) ocorrem preferencialmente nos ritmitos da Unidade Nova América, entre o povoado de Gameleira e a cidade de Lapão. O acamamento dessas rochas tem direção L-W e mergulhos sub-verticais (entre 75° e 90°). Os sumidouros estão associados a dois padrões de fraturamento NNW-SSE.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.37: Sumidouros encontrados na região de estudo. (a) Ponto J-038; (b) Ponto J-045, destaque para as setas indicando a relação entre o acamamento (seta vermelha) e fraturamento aberto (seta azul); (c) Ponto J-047. Esses três primeiros localizados no Povoado de Gameleira, município de João Dourado; (d) Ponto J-165 localizado na Fazenda Lajedo, Povoado de Bom Prazer, Município de Lapão.**



(a)



(b)



(c)



(d)



(d)



(e)

**Figura 4.38: Sumidouros e condutos subterrâneos identificados na Unidade Jussara, no Ponto J-114, localizada as margens da BA148, sentido Ibititá. (a) Construção identificando uma antiga ponte de onde localizava um cano de adutora para irrigação; (b) Deslocamento ao longo do terreno se dá por pontos onde persistem áreas mais seguras nos calcarenitos e ligadas por tábuas de madeira; (c) Detalhe da ponte de madeira; (d) Interligação entre os pontos de dissolução superficial; (d) Lapiás pouco desenvolvidos no topo; (e) Detalhe da profundidade e ligação entre os dutos subterrâneos.**

Como esses sumidouros são limitados, na largura por planos de acamamento e, no comprimento por fraturas, resulta uma aparência de caixa ou tanque, o que justifica as designações populares dessas feições. Normalmente acumulam água no período de chuva ou funcionam como pontos de surgência. Estas feições apresentam de 1 a 20 metros de largura e um comprimento muito variável, pois, como ilustrado na Figura 4.39, podem ser desde 20 metros (a) ou coincidir com toda a área de exposição (b).



(a)

(b)

**Figura 4.39: Aberturas longitudinais chamadas de “tanque” que na verdade correspondem a fendas. (a) Ponto J-001, localizado no povoado de Gameleira, município de João Dourado; (b) Ponto J-161 localizado no povoado de Conquista, município de João Dourado.**

#### 4.2.2.6.2 Feições superficiais: exocarstes

O conjunto de feições cársticas superficiais compõe as áreas morfológicas denominadas exocarstes (JENNINGS, 1971; BÖGLI, 1980; FORD; WILLIAMS, 2007). As principais formas do exocarste são os karrens (lapiás), dolinas, uvalas, poljés, maciços, torres, verrugas, arcos, pontes naturais e as feições hidrológicas.

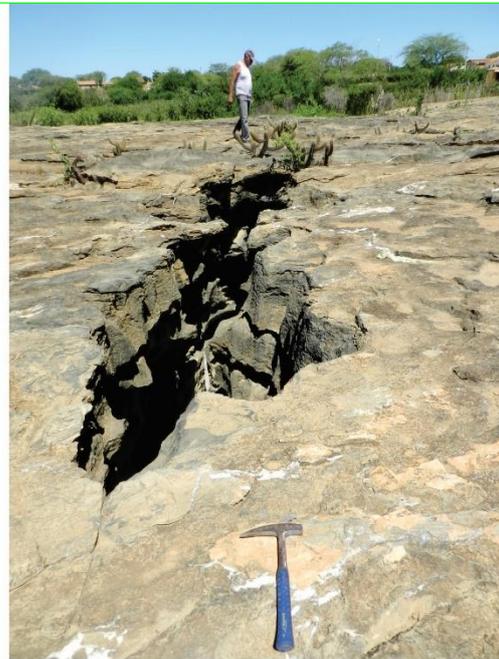
Karren, lapiéz ou lapiás são caneluras de espessura milimétrica a centimétrica, que sulcam a superfície das rochas. Os campos de lapiás são comuns em todo o carste (BIGARELLA *et al*, 1994). É a feição característica que marca o desenvolvimento inicial do carste e refere-se ao conjunto de todas as microformas que entalham a superfície das rochas solúveis.

São consideradas como dolinas as depressões fechadas e afuniladas, com formato circular ou oval, cujo tamanho varia de alguns metros até centenas de metros de profundidade e diâmetro, sendo sempre mais largas do que profundas (JENNINGS, 1971; FORD; WILLIAMS, 2007).

Feições associadas a superfícies de camada tal como os lapiás, não são muito bem desenvolvidas nos litotipos da Unidade Nova América (Figura 4.41), onde o acamamento mergulha, em geral, subverticalmente.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 4.40: Fendas na Unidade Jussara, localizados no Município de Ibititá/BA. (a) Ponto J-081; (b) e (c) J-086; (d) J-086 e (e) J-095.**



(a)

(b)

**Figura 4.41: Feições superficiais pouco desenvolvidas. (a) Lapiás; (b) Feições arredondadas com diâmetros diferentes, tipo “bacias de dissolução”; Ponto J-165, localizado no povoado de Bom Prazer, município de Lapão/BA.**

Ao contrário da disposição sub-vertical do acamamento dos litotipos da Unidade Nova América, na Unidade Jussara a horizontalidade do acamamento proporciona um arranjo de feições particulares.

As feições superficiais, associadas a topo de camada como os lapiás nos calcarenitos, são os exemplos mais significativos, enquanto que, nos calcissiltitos são menos desenvolvidos e mais dômicos (Figura 4.42). Essa feição está restrita a região SW onde afloram predominantemente os litotipos correspondentes a essa unidade.

Ocorrem também, na Unidade Jussara, as chamadas “bacias de dissolução”, com geometria arredondada, não ultrapassando 50 cm de profundidade, podendo chegar a 6 metros de comprimento (Figura 4.40).



(a)

(b)

**Figura 4.42: Morfologia aérea do tipo Lapiás. (a) Ponto J-079; (b) Ponto J-083. Localizados no centro urbano do município de Ibititá/BA.**

Outras feições superficiais, tais como micro e meso bacias de dissolução nos calcarenitos da Unidade Jussara (Figura 4.43), provavelmente resultam de uma evolução de feições de dissolução, tal como lapiás. A horizontalidade do acamamento, particularmente para os calcarenitos dessa unidade

litoestratigráfica, restringe a ocorrência dessas feições. No centro urbano da área de estudo, mais precisamente no município de Lapão, está localizada uma dolina, com profundidade estimada de 10 metros (Figura 4.44).

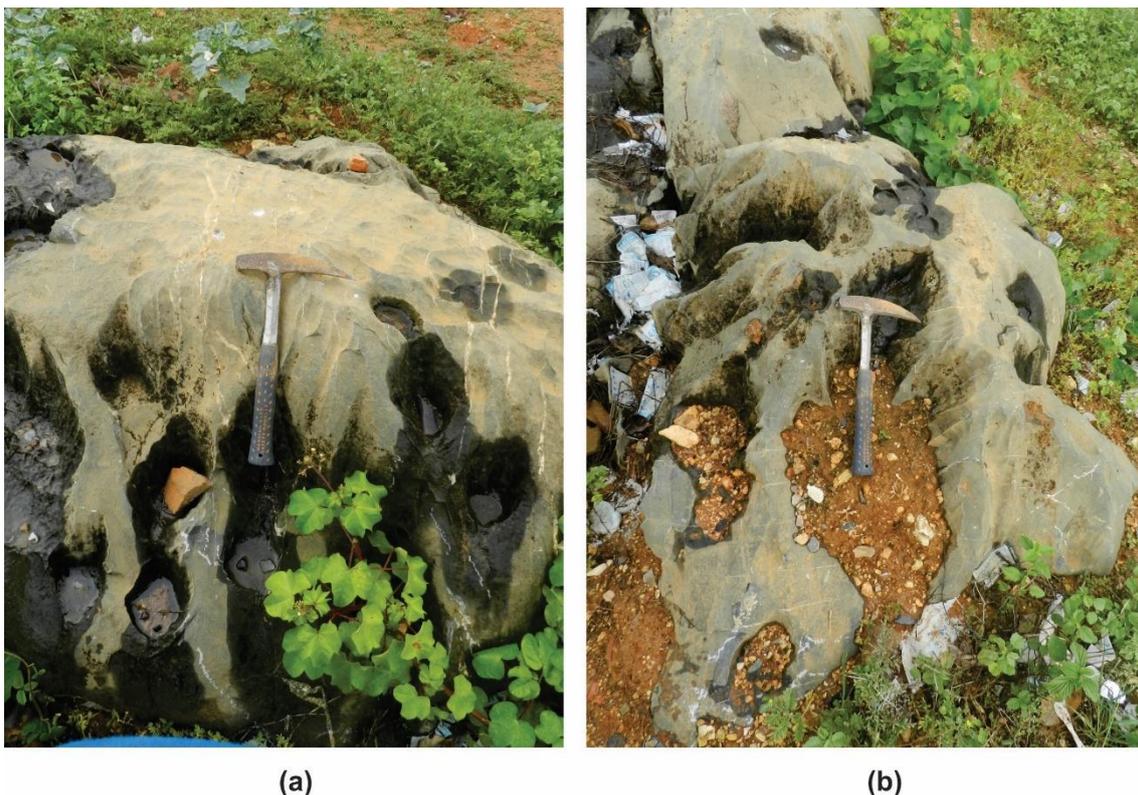


**Figura 4.43: Bacias de dissolução superficial identificadas no ponto J-095.**



**Figura 4.44: Dolina localizada no centro urbano do Município de Lapão, na região centro-norte da área de estudo. (a) Vista geral da dolina conhecida localmente como Fonte do Lapão; (b) Detalhe ilustrando a profundidade, estimada em 10 metros.**

Para os calcissiltitos correspondentes à Unidade Irecê, as únicas feições identificadas correspondem às bacias de dissolução localizadas no centro urbano de Lapão/BA, nas proximidades do Cemitério Municipal (Figura 4.45).



**Figura 4.45: Ponto J-171. (a) e (b) Microbacias de dissolução no topo dos calcissiltitos pertencentes a Unidade Irecê.**

Mostra-se, na Figura 4.46 da página seguinte, um mapeamento de dolinas, feito a partir de imagem de satélite. Chama a atenção, nesse documento, a grande concentração de dolinas individuais, imediatamente a sul da área piloto, no setor compreendido entre Ibipeba, Ibititá e Canarana. Deve ser esclarecido que essa grande intensidade de carstificação não foi confirmada em campo, mesmo porque situa-se fora da área piloto. Ela é compatível, por outro lado, com a assertiva de Beraldo (2006) de que a intensidade de carstificação, na Formação Salitre, cresce de norte para sul, sendo a região de Iraquara a mais carstificada.

O zoneamento de vazões, entretanto, mostrado na Figura 6.4, indica descargas menores que 10,0 m<sup>3</sup>/h no setor compreendido entre Ibipeba, Ibititá e Canarana, o que não parece confirmar a grande carstificação atribuída a esta área na Figura 4.46. As áreas de dolinamento, delimitadas por linhas vermelhas nessa figura, por sua vez, situam-se ao longo do eixo de grandes vazões mostrado na Figura 6.4. Essas áreas de dolinamento, assim, diferentemente das dolinas propostas para o setor compreendido entre Ibipeba, Ibititá e Canarana, parecem efetivamente assinalar maiores intensidades de carstificação.

As informações disponíveis, enfim, não ficam perfeitamente compatibilizadas. A questão fica aqui levantada e proposta como alvo dos futuros estudos do carste da Formação Salitre na região de Irecê.

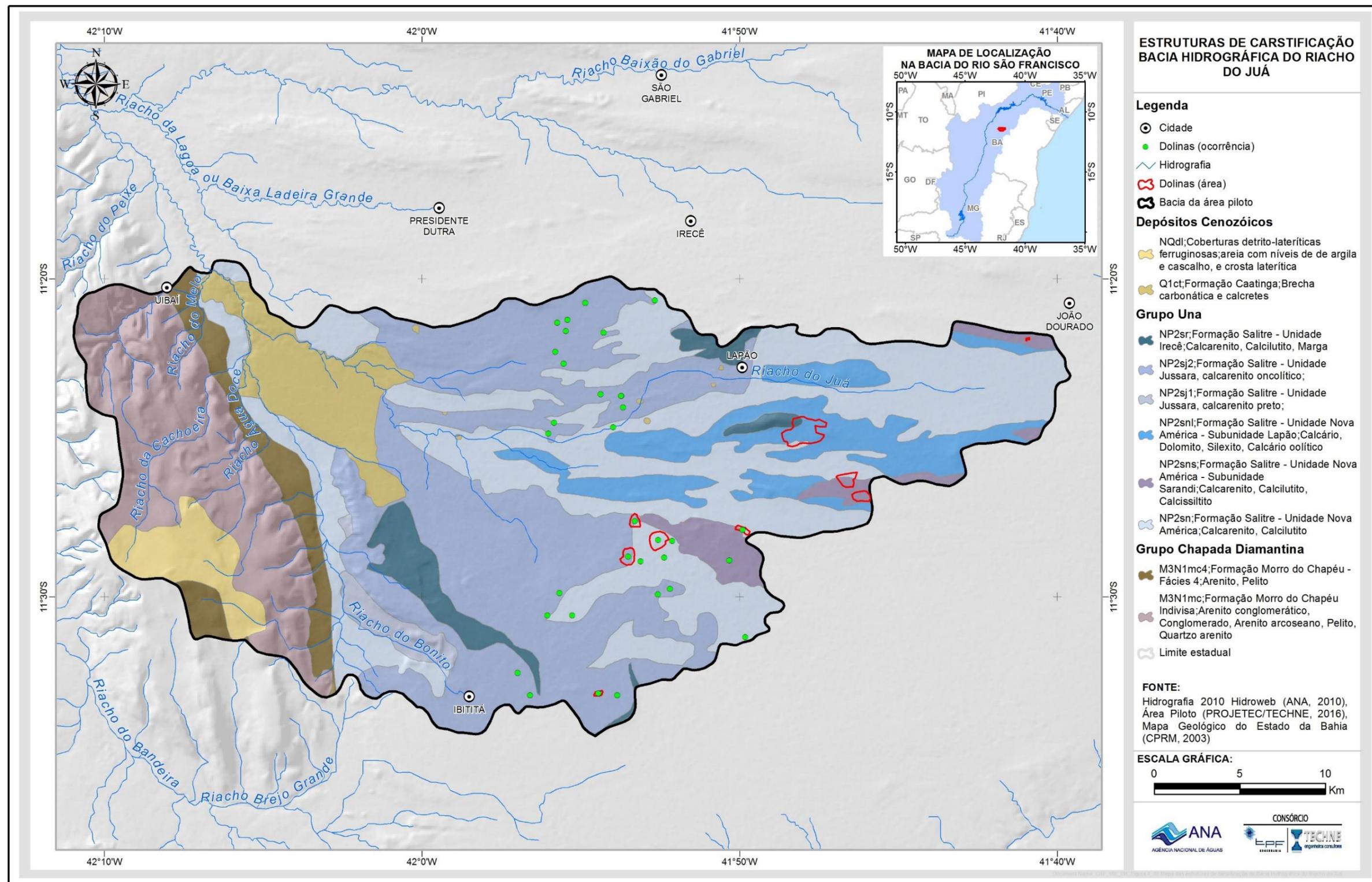


Figura 4.46: Mapa das estruturas de carstificação da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.

#### **4.2.2.7 Inventário de feições cársticas**

Durante o levantamento geológico de campo, com ênfase no reconhecimento e diferenciação dos litotipos pertencentes à Formação Salitre, além do levantamento estrutural, foram identificadas situações onde a evolução de algumas feições de dissolução causaria algum tipo de efeito à população local.

Na área piloto foram levantados 22 abatimentos de terreno, sendo 17 no município de Lapão (área urbana e rural) e cinco em áreas rurais do município de João Dourado. Fora da área piloto foram registradas treze ocorrências, sendo três no município de Ibipêba e dez no município de Barro Alto. Nas áreas rurais essas ocorrências se resumem ao surgimento de dolinas e sumidouros. Nas áreas urbanas, como Lapão, por exemplo, as ocorrências trazem consigo trincas em edificações e desnivelamento da pavimentação de ruas e avenidas, o que causa sempre prejuízos materiais e, por vezes, de saúde para a população.

Durante o cadastramento de poços e reconhecimento de feições cársticas, nas bacias de Irecê e do Salitre, foram registradas fazendas de irrigação onde surgem dolinas e sumidouros. Os relatos dão conta de que nos últimos anos o problema tem sido agravado e que essas feições costumam surgir sempre após a época de chuva.

##### **4.2.2.7.1 Município de Ibipêba**

Onze pontos de colapso do solo foram levantados na localidade conhecida como Vereda, mais precisamente no Lote 236 do Distrito de Irrigação de Mirorós. Esses colapsos se manifestam sob a forma de crateras circulares ou, dependendo da espessura do solo, sob a forma de sumidouros (Figura 4.47).

Colapsos do solo foram também levantados na Fazenda Casa Nova, na localidade conhecida como Salina, também no Distrito de Irrigação de Mirorós. Esses abatimentos tiveram início no ano de 2012, no período de chuvas, segundo o proprietário. Formam-se inicialmente depressões circulares que se enchem de água. Após o período chuvoso a água se infiltra e as depressões ficam secas (Figura 4.48, Mosaico ee. (a), (b), (c) e (d)).

Nas proximidades do centro urbano do Distrito de Mirorós ocorre processo semelhante. Há um abatimento brusco gerando as crateras circulares, rasas, ou aparecendo sumidouros. No Centro urbano do Distrito de Mirorós, no dia 14 de janeiro de 2014, houve o abatimento do teto de uma caverna na propriedade do Senhor Amaury (Figura 4.48 (e) e (f)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 4.47: Subsidiência de solo, ponto J-023G. (a) e (b) Abatimento do solo; (c) e (d) Abatimento associado ao aparecimento de sumidouro, mas, sem água; (e) e (f) mesmo fenômeno, mas, com água correndo e segundo informações, de regime perene.**



**Figura 4.48: Processo de abatimento nas proximidades do centro urbano do Distrito de Mirorós. (a) e (b) Subsidiência do solo formando feições arredondadas rasas; (c) e (d) Formação de sumidouro; (e) e (f) abatimento do teto de caverna.**

#### **4.2.2.7.2 Município de Barro Alto**

No município de Barro Alto, na Fazenda Pé de Limão, há uma particularidade que são os colapsos de terreno associados ao aparecimento de sumidouros. A espessura do solo aqui é menor, com cerca de 1,0 metro, diferentemente dos casos anteriores. Sob o solo vêm-se camadas de ritmitos pertencentes a Unidade Nova América. Segundo relatos, esses processos de subsidiência do terreno ocorrem desde 2012, gerando sumidouros alongados com orientação 225Az e 160Az. A largura das aberturas aumenta na época de chuva (Figura 4.49).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 4.49: Visita aos pontos de ocorrência dos abatimentos na Fazenda Pé de Limão Ponto J-025G. (a) e (b) camada de solo rasa areno-argilosa de coloração amarronzada e o calcário apresenta uma cobertura residual esbranquiçada, mas, ainda é perceptível a intercalação entre as laminações; (c) e (d) Outro ponto localizado a 2 metros do anterior obedecendo às mesmas características descritas anteriormente, mas, apresenta uma cobertura de solo mais espessa.**

No povoado de Honorato foi verificado outro caso de formação de sumidouro. O evento teve início há cerca de cinco anos numa fazenda de irrigação de milho (sequeiro) após as fortes chuvas que caíram entre dezembro/2013 e janeiro/2014. O sumidouro é alongado na direção NE e, segundo o proprietário, sua largura vêm aumentando ao longo dos anos.



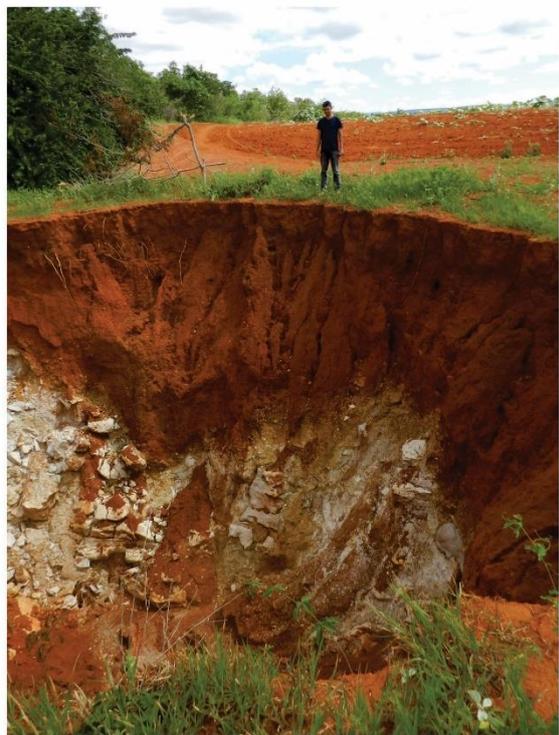
(a)



(b)



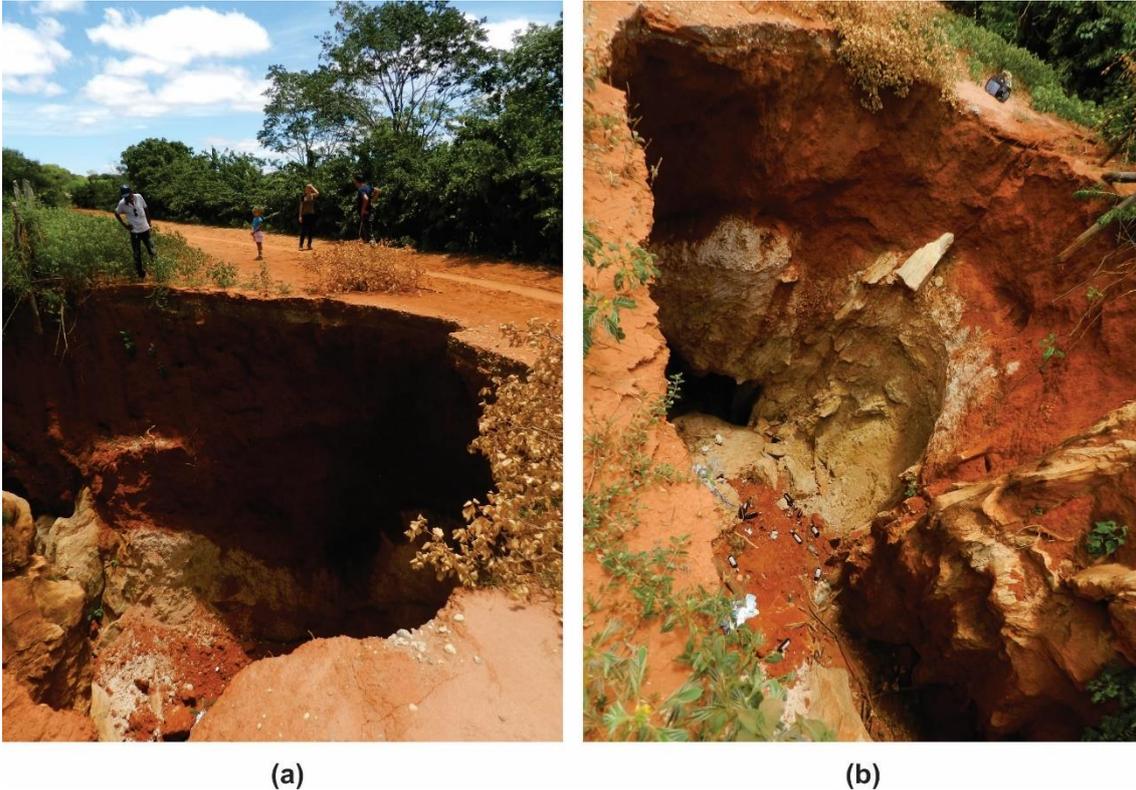
(c)



(d)

**Figura 4.50: Vista geral da área afetada, Ponto J-030G. (a) Geometria subarrondada apresentando uma variação na espessura do solo como uma rampa até a entrada do sumidouro; (b) e (c) Sumidouro; (d) Vista da área com maior espessura do solo.**

Um grande sumidouro formou-se nas vizinhanças do limite entre os municípios de Ibipeba e Barro Alto, numa estrada vicinal que dá acesso ao centro urbano do Povoado de Paz de Salobro. A evolução da feição causou a obstrução de uma das vias (Figura 4.51).



**Figura 4.51: Vista geral do desabamento na área rural, Ponto J-029G. (a) Solo argiloso de coloração avermelhada e bem espesso; (b) Sumidouro.**

#### 4.2.2.7.3 Município de João Dourado

Na Fazenda Baixa da Pedra, povoado de Conquista, o Sr. José Carlos da Cebola relata que há cerca de doze anos, numa certa tarde, após a colheita de cenoura, ouviu-se um grande estrondo associado a um colapso repentido do terreno, que formou uma grande dolina (Figura 4.52). Segundo o mesmo senhor, a dolina permaneceu estabilizada após o evento, sem qualquer movimentação posterior.



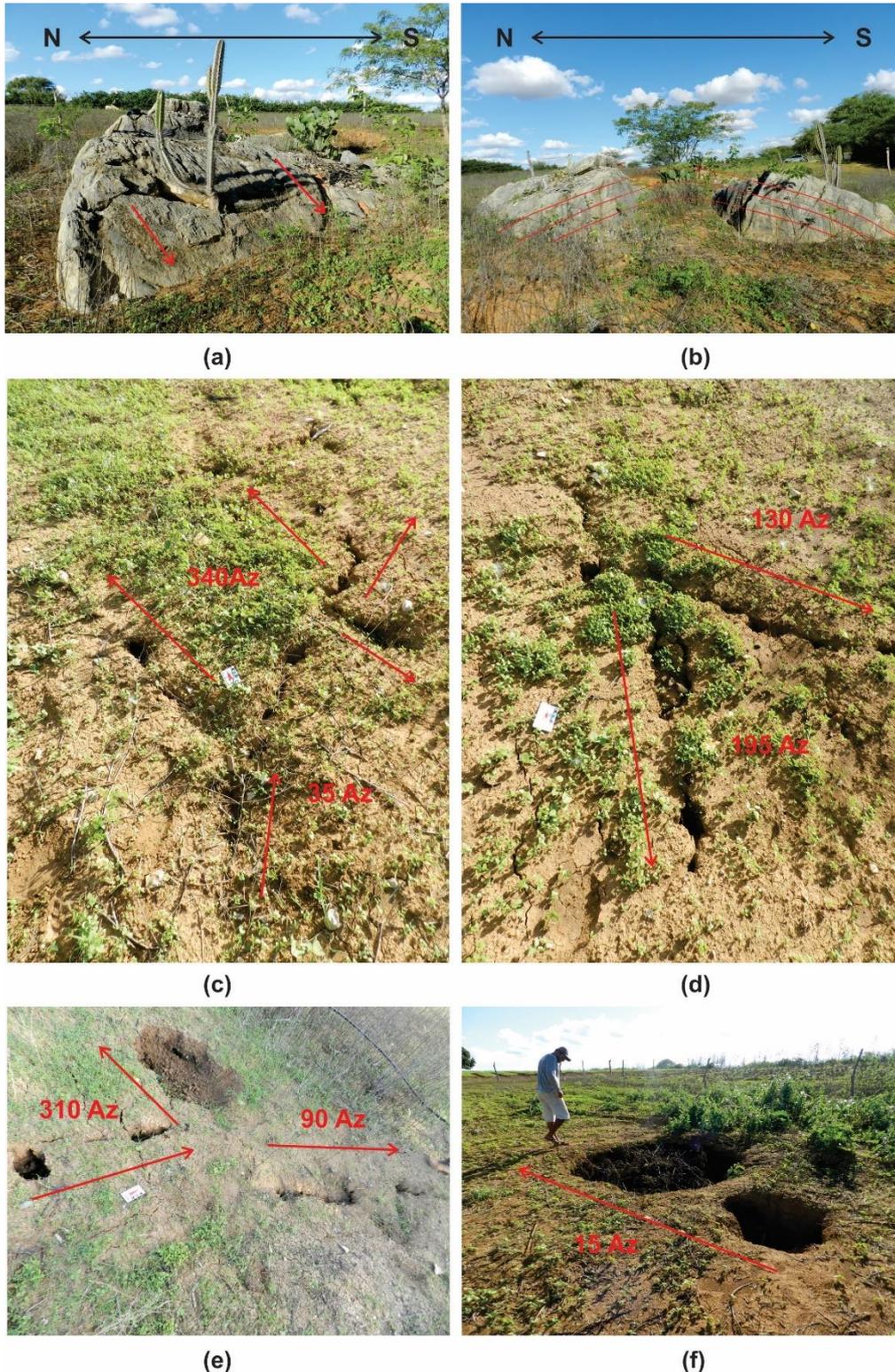
**Figura 4.52: Ponto J-018G, Povoado de Conquista. (a) Colapso do terreno que gerou uma cratera com aproximadamente 15 metros de profundidade; (d) Detalhe ilustrando a relação entre o solo raso sobrepondo os calcários da Formação Caatinga.**

#### **4.2.2.7.4 Povoado de Gameleira dos Crentes**

Na Fazenda Moreira, no povoado de Gameleira dos crentes, foram identificadas, durante o mapeamento geológico, rachaduras, trincas e pequenos a médios abatimentos do solo, recentemente surgidas (Figura 4.53). Segundo relato do proprietário, Sr. Cleber Moreira, os primeiros abatimentos surgiram no início do ano de 2014.

Afloram na propriedade os ritmitos da Unidade Nova América, onde a densidade de fraturas abertas é alta e as direções são de 9Az, 72Az e 352Az, refletindo N-S e NNW-SSE. As direções das trincas e rachaduras medidas na propriedade, têm direções preferenciais variando de NE-SW a NW-SE (130Az, 160Az, 195Az, 212Az, 215Az e 225Az) refletindo o padrão estrutural de uma das famílias do Domínio E do Grupo Una, conforme discutido anteriormente.

Esses problemas de subsidência e colapso ocorrem associados a fendas contínuas. Nos pontos onde aparecem pequenas áreas colapsadas não afloram rochas no substrato. Essas áreas têm diâmetro variando de 20 cm a 1 metro.



**Figura 4.53: Ponto J-017G, Fazenda Moreira. (a) Acamamento com mergulho para S e fraturas abertas refletindo o padrão N-S e NE-SW; (b) Sinclinal mergulhos de 54° para S e 57° para N e direção E-W do eixo axial; (c) e (d) Trincas e fendas abertas com cerca de 2 cm de abertura em média, apresentando três direções distintas conforme indicado pelas setas vermelhas; (e) Fendas e pequenos colapsos associados; (f) Abatimentos isolados alinhados na direção NNE, rasos, com profundidade aproximada de 50 cm.**

#### **4.2.2.7.5 Município de Lapão**

A cidade de Lapão e seus arredores foi objeto de um estudo geofísico de detalhe, pelo método de eletrorresistividade. Em consequência, o histórico das rachaduras e abatimentos do terreno, bem como os estudos já realizados, tanto na área urbana como na área periurbana da cidade de Lapão, serão discutidos mais adiante, nos tópicos 5.2.2.1 e 11.6.

### **5. Geofísica**

Os estudos geofísicos na área piloto da Bacia do Riacho do Juá foram realizados através da aplicação do método gravimétrico e do método de eletrorresistividade, com o objetivo de identificar a compartimentação estrutural do sistema aquífero, definir extensões e espessuras, variações faciológicas e as relações com o embasamento.

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 conseqüentemente, na sua modelagem e na locação de poços.

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.

#### **5.1 Gravimetria**

O estudo gravimétrico constou da realização de 30 estações gravimétricas distribuídas regularmente na área. Na Tabela 5.1 são mostradas as coordenadas das estações gravimétricas. A posição dessas estações é mostrada na Figura 5.1.

**Tabela 5.1 – Coordenadas das estações gravimétricas.**

ESTAÇÃO	ZONA	LONGIT. UTM	LATID. UTM
J01	23L	816867.00 m E	8739227.00 m S
J02	23L	816666.00 m E	8730777.00 m S
J03	23L	821433.00 m E	8733531.00 m S
J04	23L	822785.00 m E	8726264.00 m S
J05	23L	822376.00 m E	8739544.00 m S
J06	23L	823225.00 m E	8735321.00 m S
J07	23L	827283.00 m E	8727602.00 m S
J08	24L	174760.00 m E	8722514.00 m S
J09	24L	173435.00 m E	8741364.00 m S
J10	24L	173915.00 m E	8737099.00 m S
J11	24L	173182.00 m E	8732054.00 m S
J12	24L	178358.00 m E	8724481.00 m S
J13	24L	179489.00 m E	8740389.00 m S
J14	24L	177029.00 m E	8736564.00 m S
J15	24L	178911.00 m E	8729123.00 m S
J16	24L	181047.00 m E	8732588.00 m S
J17	24L	182646.00 m E	8735186.00 m S
J18	24L	184949.00 m E	8738076.00 m S
J19	24L	185372.00 m E	8741256.00 m S
J20	24L	186784.00 m E	8729989.00 m S
J21	24L	189066.00 m E	8735238.00 m S
J22	24L	190428.00 m E	8739808.00 m S
J23	24L	192545.00 m E	8735336.00 m S
J24	24L	193509.00 m E	8732450.00 m S
J25	24L	195885.00 m E	8735402.00 m S
J26	24L	198222.00 m E	8739126.00 m S
J27	24L	200053.00 m E	8734286.00 m S
J28	24L	203821.00 m E	8730703.00 m S
J29	24L	205414.00 m E	8735414.00 m S
J30	24L	205589.00 m E	8739262.00 m S



A aplicação da gravimetria na área piloto do riacho do Juá obedeceu a três etapas distintas, descritas a seguir:

➤ **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. Essas correções foram previamente realizadas pela empresa GPR GEOFÍSICA LTDA. Isso permitiu a composição, logo no início dos trabalhos, dos mapas de Anomalia Bouguer Completa.

**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.

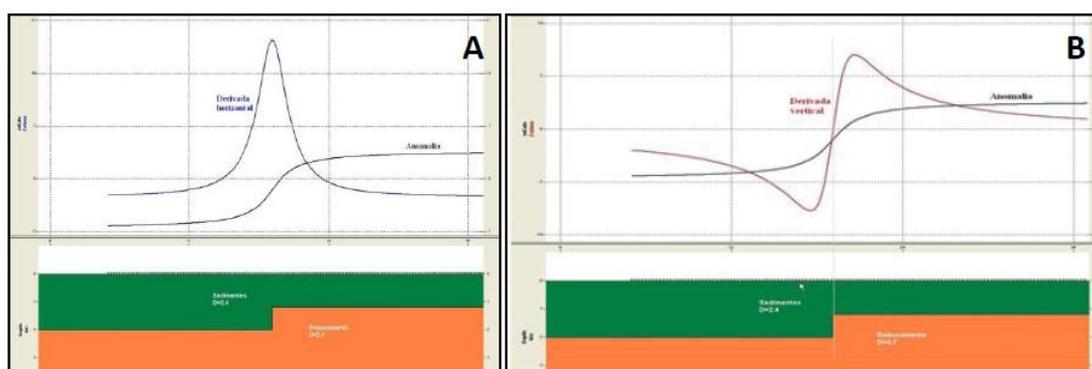
Uma vez isoladas as anomalias de interesse, os procedimentos de interpretação geológica consideram, normalmente, apenas o mapa residual.

## ➤ Realce das anomalias

Derivadas das medições gravimétricas

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 subverticais, 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), obtido 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 por:

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

onde  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  são as coordenadas da fonte anômala;  $M$  a anomalia gravimétrica;  $R$  o campo gravimétrico residual e  $\eta$  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 do riacho do Juá, decorrem de variações de profundidade do embasamento do Grupo Bambuí.

### **5.1.1 Modelagem com geometria 2D e 3D**

A modelagem da área piloto do riacho do Juá 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 g/cm<sup>3</sup> para o embasamento cristalino, 2,59 g/cm<sup>3</sup> para a densidade média dos sedimentos que o recobrem e 2,00 g/cm<sup>3</sup> 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. Esses modelos foram compostos com o objetivo de se obter uma melhor visualização do comportamento lateral do embasamento cristalino.

### **5.1.2 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
- Modelagens 2D e 3D – Figura 5.7

Esses documentos são mostrados a seguir.

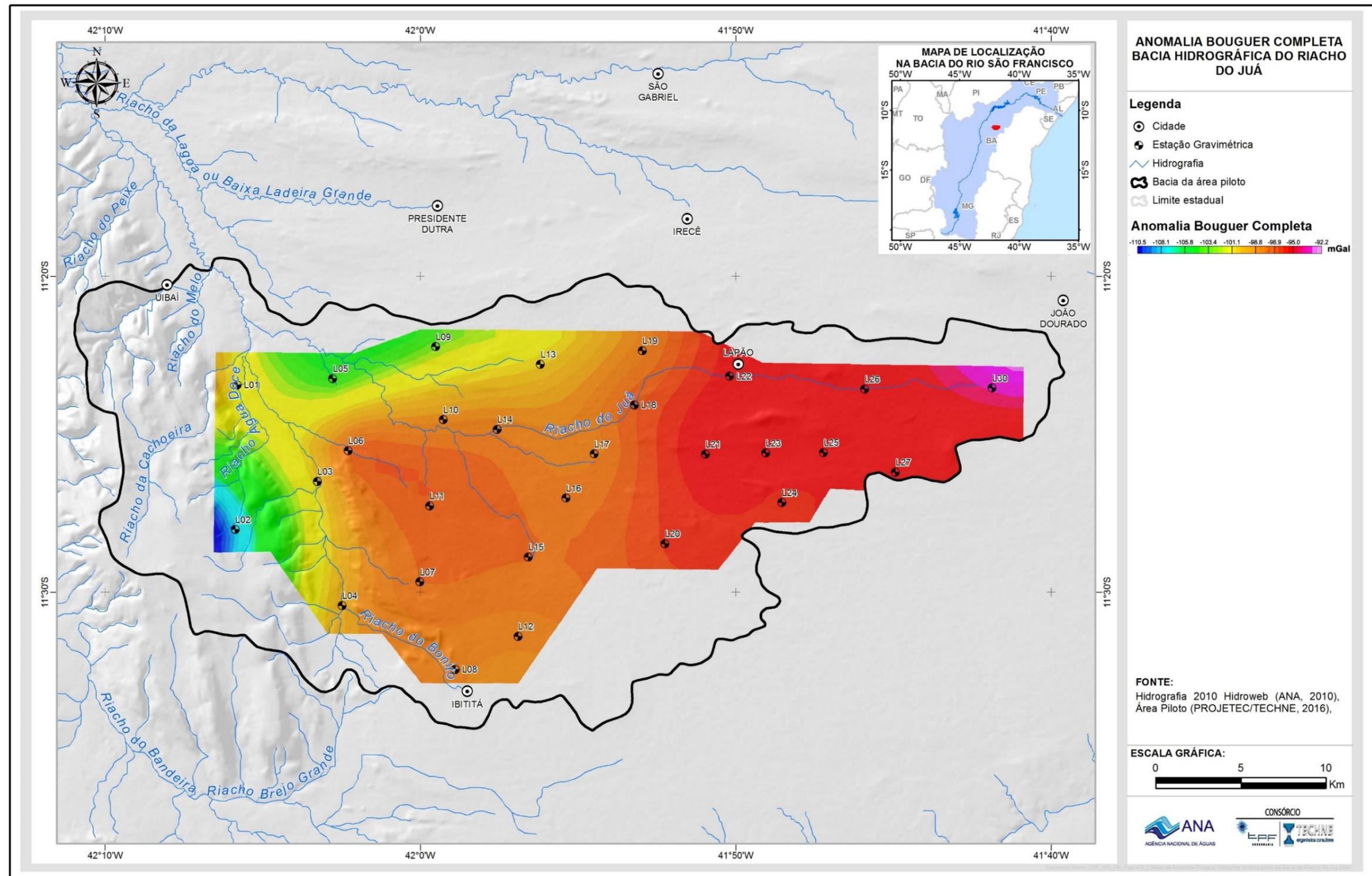


Figura 5.3: Mapa da Anomalia Bouguer Completa da área piloto da Bacia do Riacho do Juá (BA).

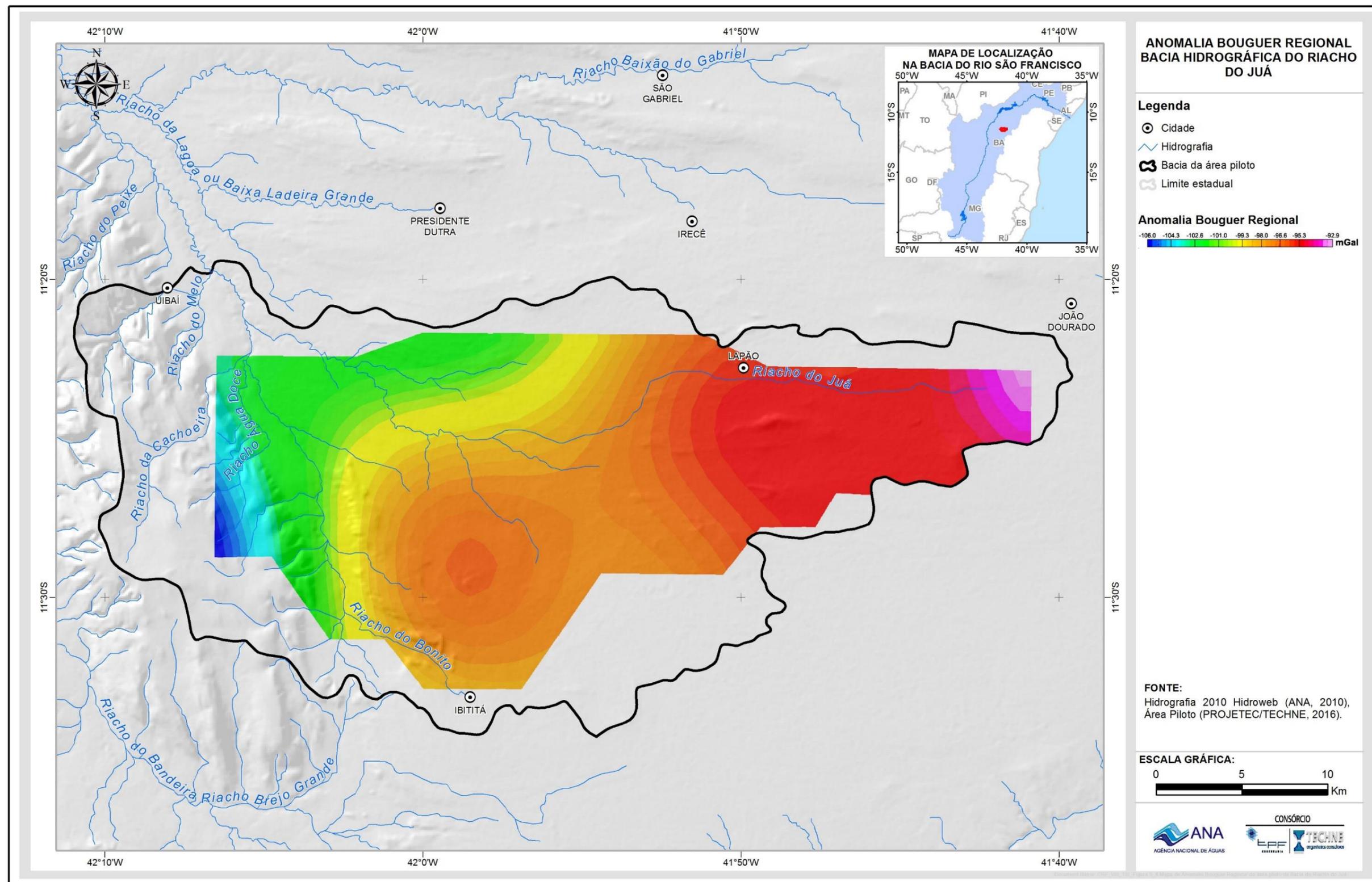


Figura 5.4: Mapa de Anomalia Bouguer Regional da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

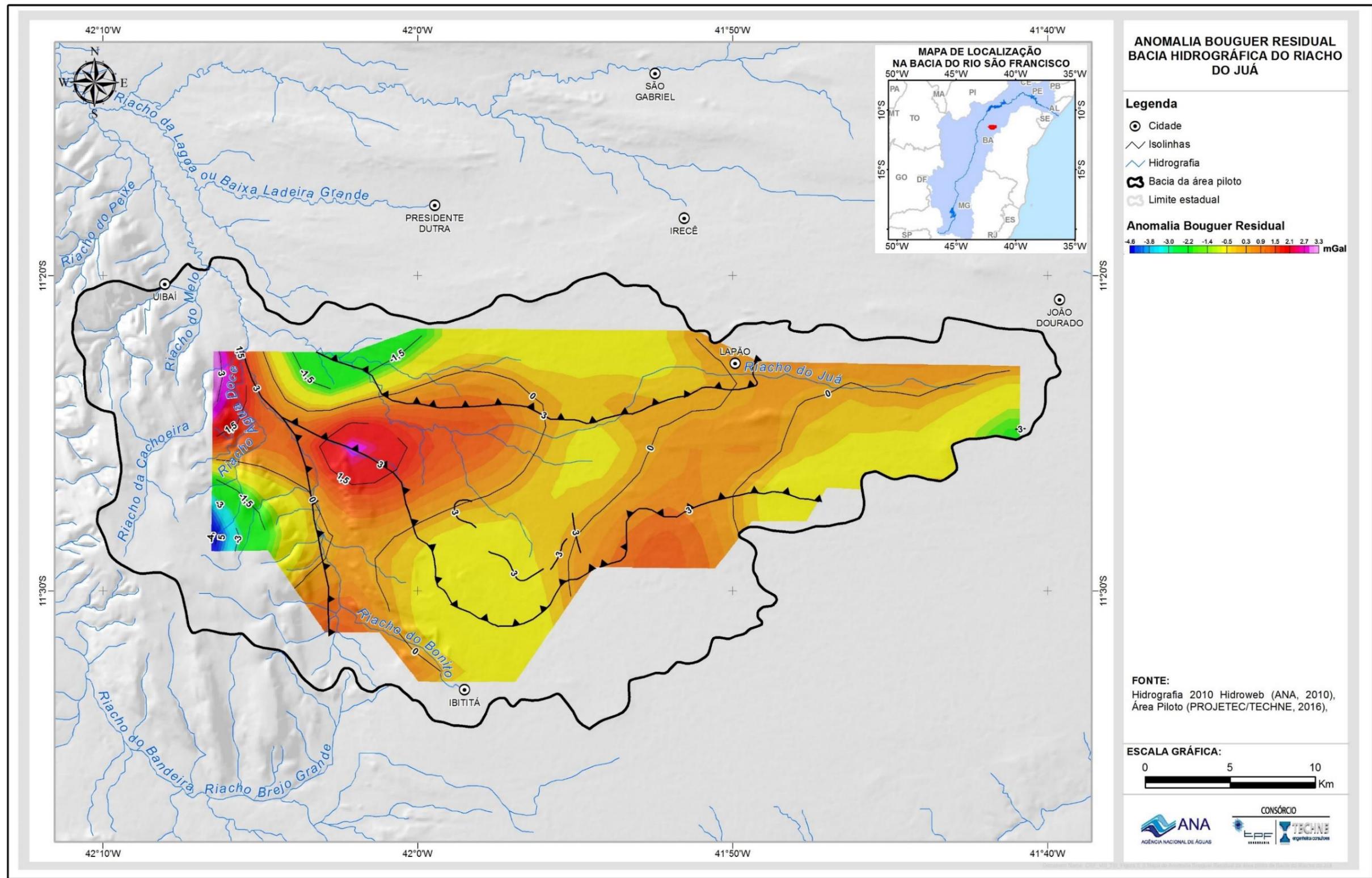


Figura 5.5: Mapa de Anomalia Bouguer Residual da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

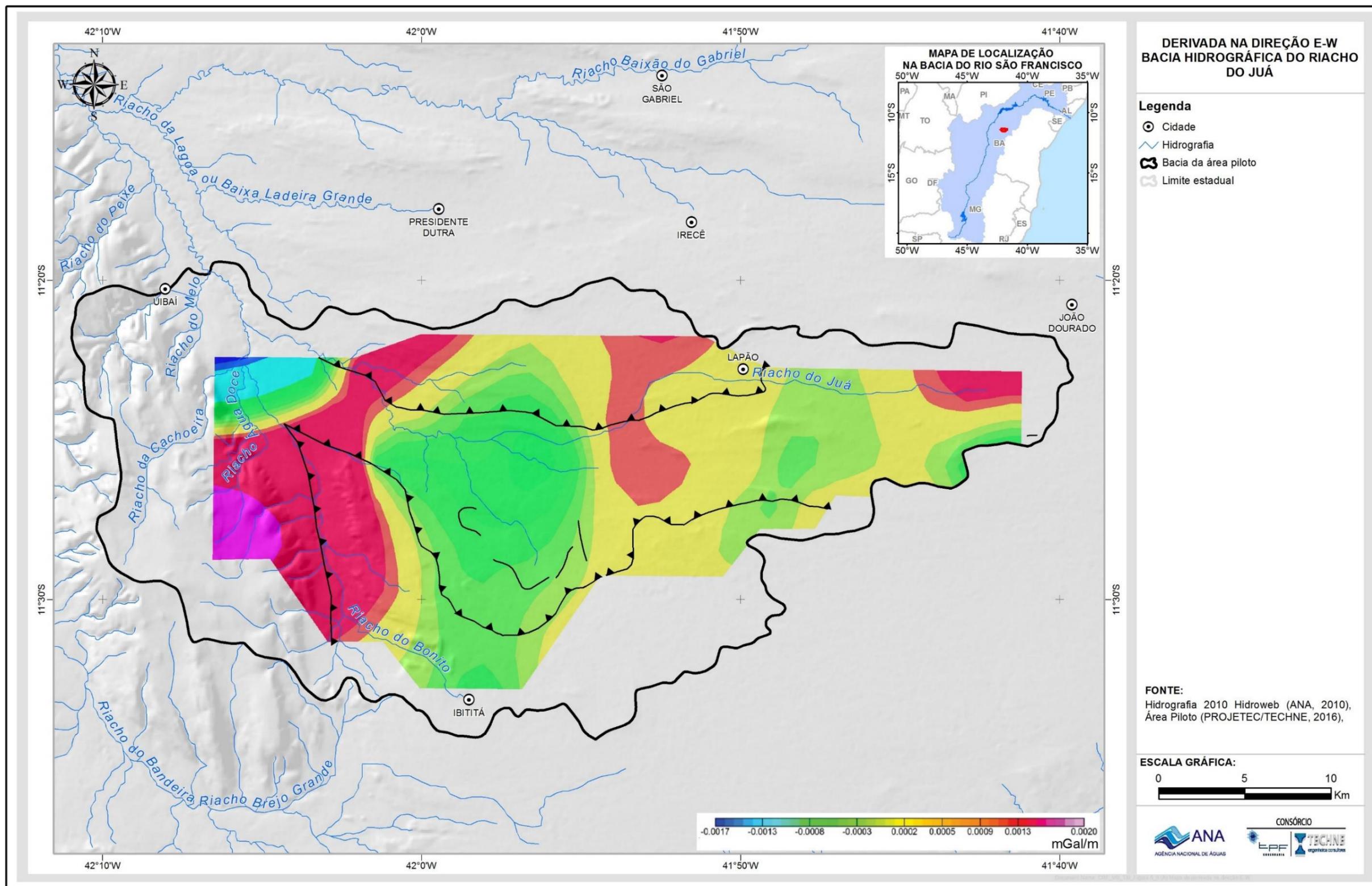


Figura 5.6 (A): Mapa de derivada na direção E-W.

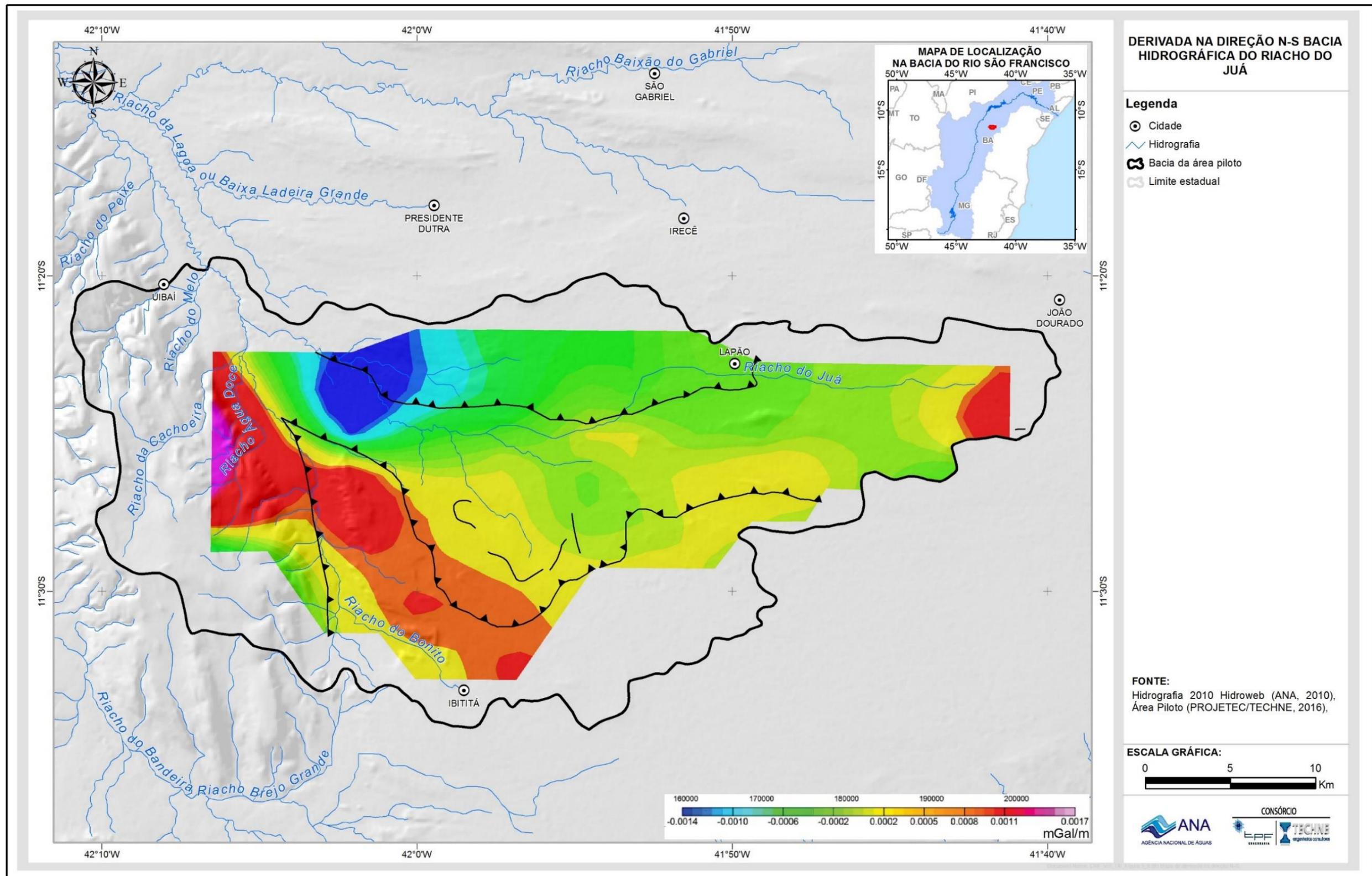


Figura 5.6 (B): Mapa de derivada na direção N-S.

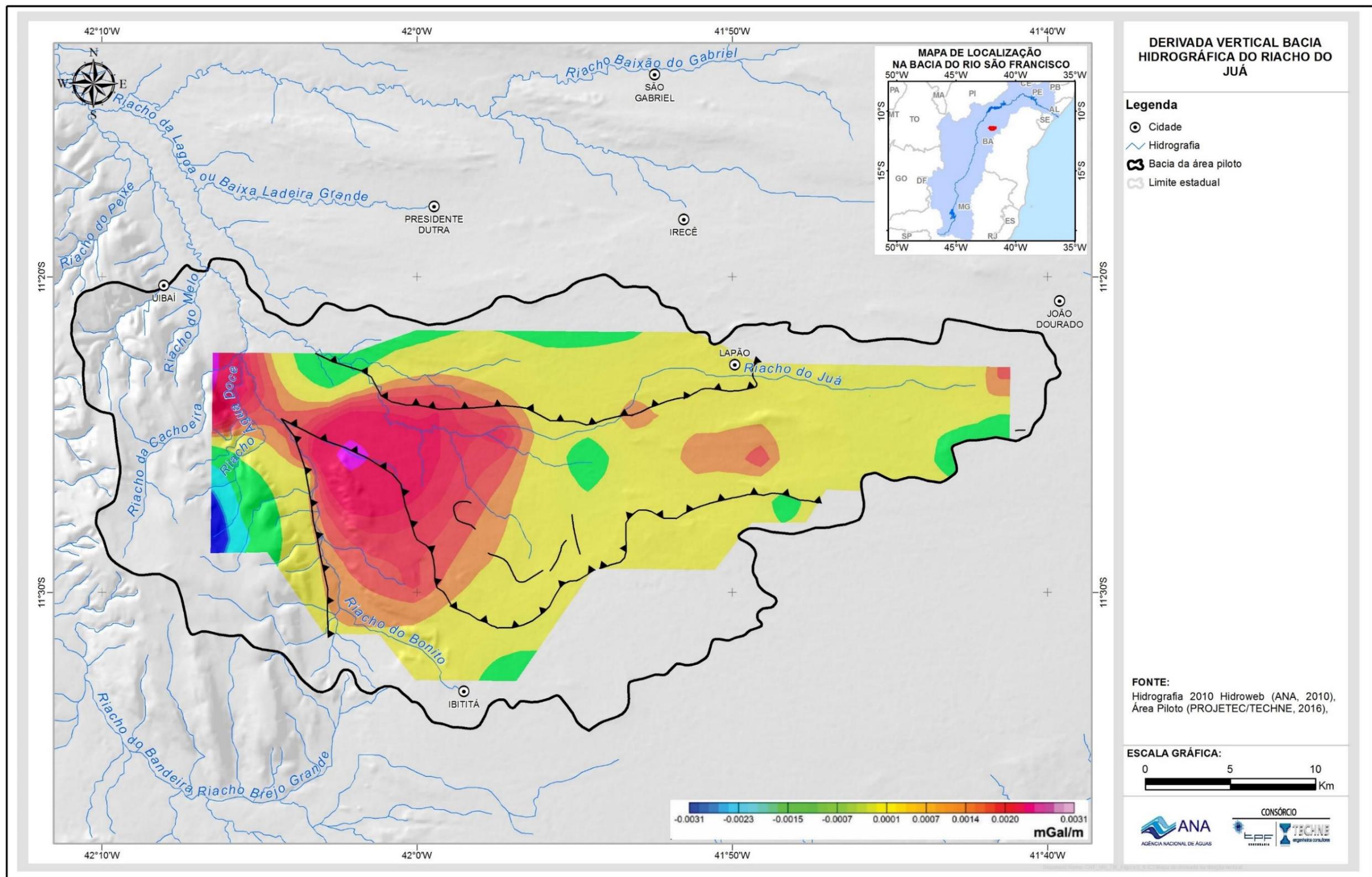
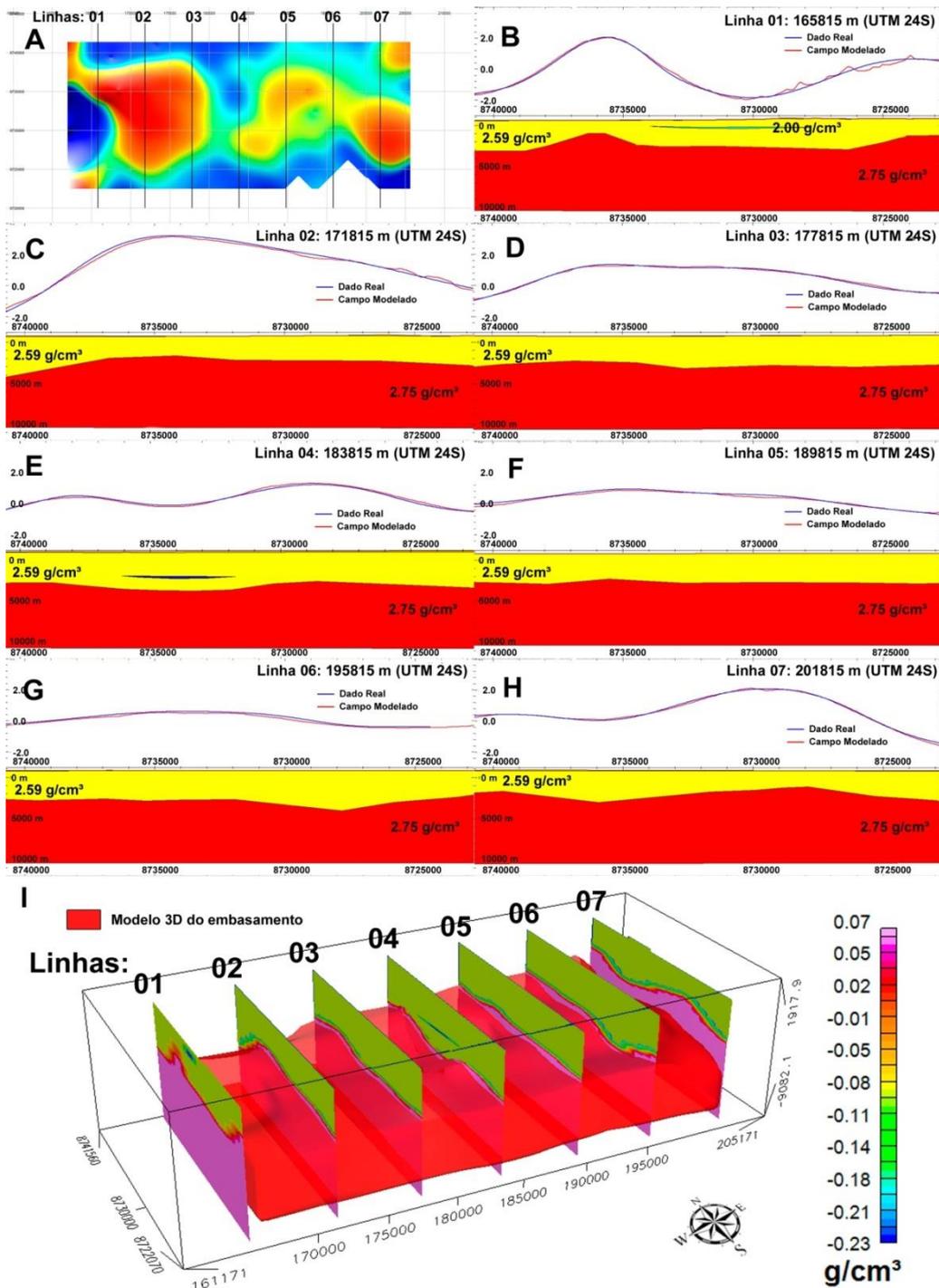


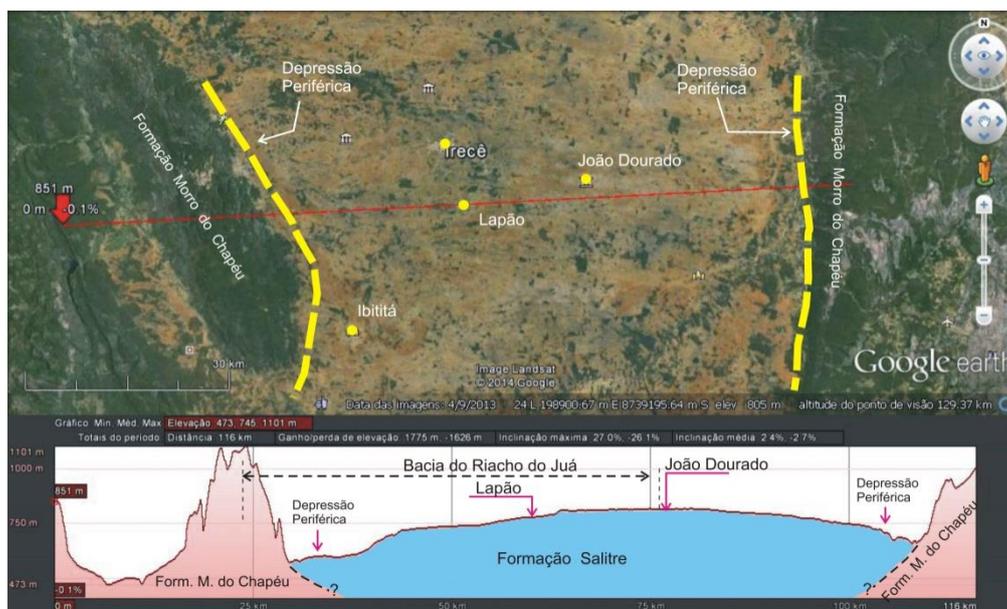
Figura 5.6 (C): Mapa de derivada na direção vertical.



**Figura 5.7: Modelagens 2D e 3D da região da bacia do riacho do Juá: (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.**

Nos mapas de anomalia Bouguer (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5) delinea-se grosseiramente uma estruturação L-W, compatível com o padrão regional dos eixos de dobramento do calcário Salitre. O mapa de anomalia Bouguer residual (Figura 5.5), em particular, mostra extensa zona de anomalia positiva alinhada

aproximadamente W-L, na porção oeste da área piloto, ao norte da localidade de Canoão. Como pode ser observado na Figura 5.1, acima, esta zona de anomalia positiva envolve as estações gravimétricas de números 1, 2, 3, 4, 6, 10 e 11. As quatro primeiras estações, em particular, foram medidas fora da Formação Salitre, sobre quartzitos da Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina. Esta formação, com efeito, limita a oeste e a leste os calcários da Formação Salitre, sendo lícito admitir que a mesma constitua o substrato dos calcários Salitre na chamada bacia de Irecê, tanto geologicamente como gravimetricamente (Figura 5.8).



**Figura 5.8: Substrato da Formação Salitre.**

Os mapas de derivadas direcionais (Figura 5.6) não evidenciaram nenhuma descontinuidade significativa nas direções N-S e E-W que pudessem ser relacionadas a falhamentos importantes. A derivada vertical (Figura 5.6), por sua vez, ressaltou a anomalia positiva localizada a norte da localidade de Canoão, porém sem acrescentar novas informações.

Em função do acima exposto verifica-se que o mapa Bouguer residual reflete o comportamento do topo do substrato quartzítico dos calcários Salitre.

As zonas de resíduo positivo correspondem a altos do substrato quartzítico, enquanto que as zonas de resíduo negativo, por outro lado, correspondem ao embasamento quartzítico mais profundo.

### 5.1.3 Mapa do topo do embasamento gravimétrico

A partir dos modelos com geometria 2D e 3D (Figura 5.7) 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 5.9). Esta superfície, no presente estágio de conhecimento do problema, está sendo interpretada como o substrato do Grupo Una, representado pelo topo dos quartzitos Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina.

A superfície de contraste gravimétrico (provável topo do Grupo Chapada Diamantina) apresenta-se bastante movimentada. Essa superfície mostra, no

extremo oeste da área, cotas de -3000 metros (entre 3500 m e 3700 metros de profundidade em relação à superfície). A porção central configura-se como a mais profunda com cotas da ordem de -4200 metros (aproximadamente 4900 m de profundidade da superfície).

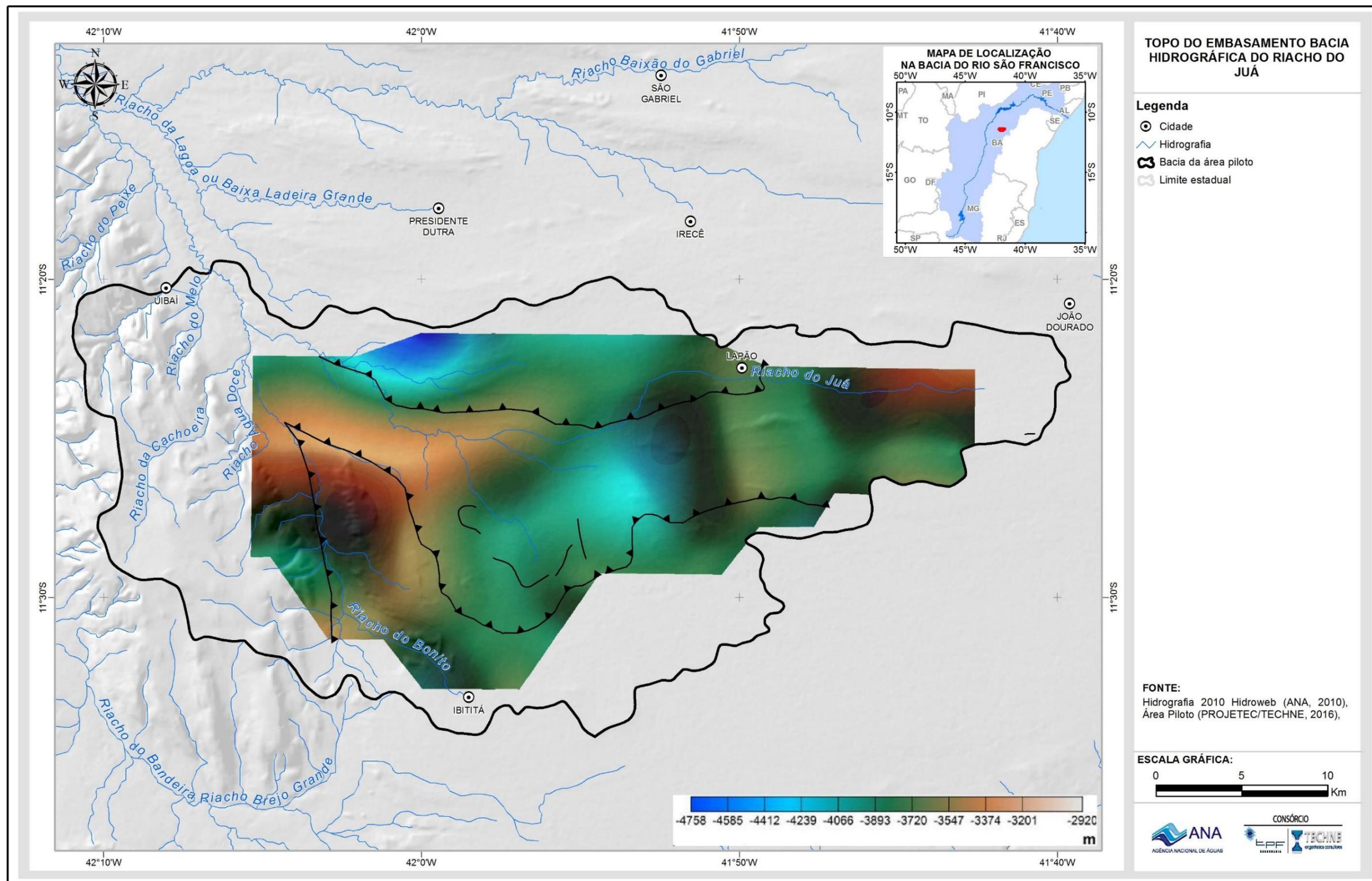


Figura 5.9: Mapa estrutural do topo do embasamento baseado nas modelagens 2D e 3D da área piloto da Bacia do Riacho do Juá. O desvio para as profundidades é de  $\pm 100$  m.

As estações gravimétricas medidas sobre os quartzitos da Formação Morro do Chapéu confirmam, qualitativamente, que a densidade dessas rochas é significativamente maior que a densidade dos calcários sobre elas assentados.

No ponto de coordenadas 183.000 e 8.734.000, a aplicação da Deconvolução de Euler implicou a consideração de uma depressão do substrato da ordem de 2000 metros para se conseguir um ajuste satisfatório do modelo teórico aos dados de campo. Essa seria, assim, a espessura da Formação Salitre no ponto considerado. Esse resultado pode ser considerado como factível em face da informação do poço DNPM 01-CL-BA (809.229.00 m E; 8.755.427.00 m S – Zona 23L) perfurado na década de 1970 no povoado de Floresta, entre as cidades de Central e Hidrolândia, 30 km a NNW de Canoão. Este poço, com efeito, atravessou 1000 metros de calcário Salitre sem encontrar o topo dos quartzitos.

As espessuras máximas da Formação Salitre previstas pela gravimetria (3500 a 4900 metros) devem ser encaradas com reservas no estágio atual de conhecimentos do problema. O mapa do topo do embasamento (Figura 5.9), entretanto, provê uma visualização confiável da movimentação desse topo. Neste sentido é possível encarar, por exemplo, a anomalia positiva a norte de Canoão como uma apófise dos quartzitos da Serra do Uibaí na direção leste, a pequena profundidade. Para leste dessa anomalia os quartzitos se aprofundam, gerando anomalias Bouguer residuais negativas.

## **5.2 Eletrorresistividade**

Neste tópico serão abordados, separadamente, os estudos geofísicos realizados na área do projeto piloto do riacho do Juá como um todo, e os estudos de detalhe realizados na área de Lapão.

### **5.2.1. Área piloto**

#### **5.2.1.1 Sondagens Elétricas**

Foram realizadas 26 sondagens elétricas verticais na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, no período de 17 de junho a 30 de agosto de 2014. Foi utilizado, como dispositivo de medição, o quadripolo linear simétrico de Schlumberger. O comprimento de linha AB de emissão de corrente variou entre 2000 e 4000 metros. A distribuição das SEVs é mostrada na Figura 5.10. Na Tabela 5.2 é mostrada a relação das mesmas.

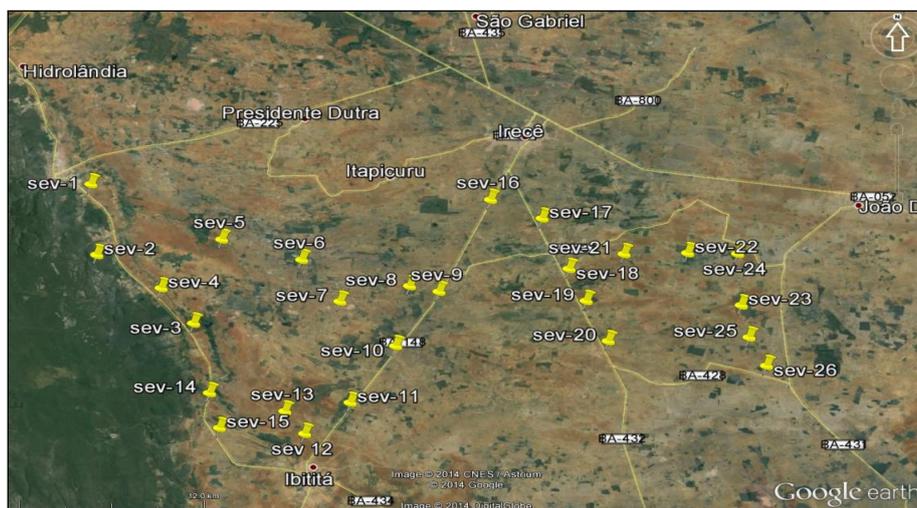
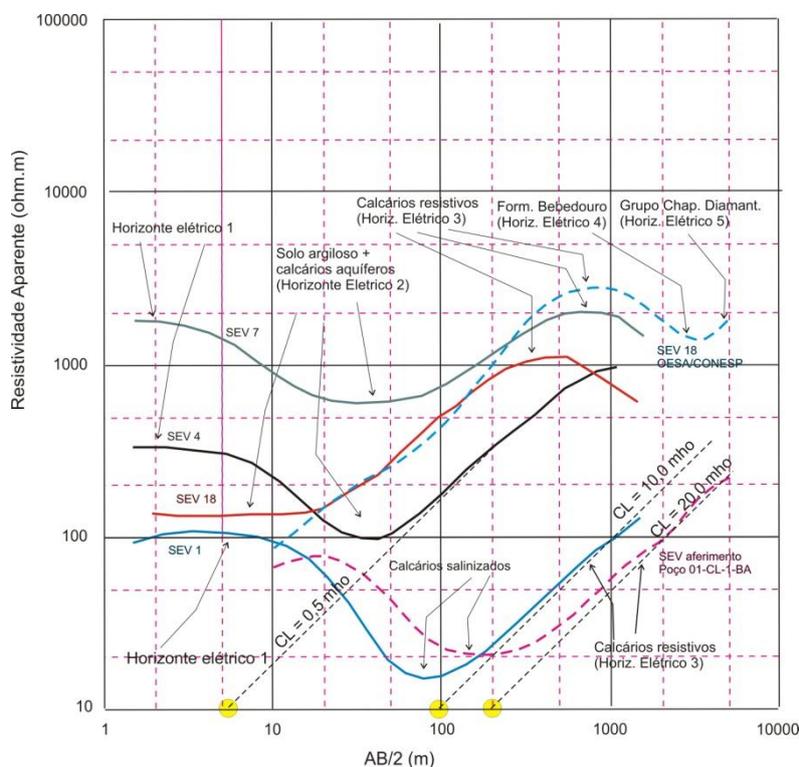


Figura 5.10: Distribuição das SEVs na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

Tabela 5.2 – Relação das SEVs na área piloto do Riacho do Juá.

ESTAÇÃO	ZONA	LONGITUDE UTM	LATITUDE UTM
SEV1	23 L	815066,91 m E	8743924,63 m S
SEV2	23 L	815577,45 m E	8738310,55 m S
SEV3	23 L	821862,34 m E	8732926,48 m S
SEV4	23 L	819726,09 m E	8735699,94 m S
SEV5	23 L	823640,32 m E	8739592,83 m S
SEV6	24 L	174028,61 m E	8738047,67 m S
SEV7	24 L	176596,53 m E	8734807,12 m S
SEV8	24 L	181086,17 m E	8736161,70 m S
SEV9	24 L	183012,08 m E	8735770,63 m S
SEV10	24 L	180319,18 m E	8731390,34 m S
SEV11	24 L	177502,74 m E	8726834,26 m S
SEV12	24 L	174621,66 m E	8724290,62 m S
SEV13	24 L	173292,80 m E	8726036,76 m S
SEV14	23 L	822957,89 m E	8727413,94 m S
SEV15	23 L	823620,39 m E	8724652,18 m S
SEV16	24 L	186142,71 m E	8743131,79 m S
SEV17	24 L	189525,66 m E	8741745,51 m S
SEV18	24 L	191378,37 m E	8737807,29 m S
SEV19	24 L	192562,61 m E	8735309,15 m S
SEV20	24 L	194072,66 m E	8732172,37 m S
SEV21	24 L	194903,15 m E	8739079,28 m S
SEV22	24 L	199019,79 m E	8739271,45 m S
SEV23	24 L	202594,66 m E	8735243,00 m S
SEV24	24 L	202259,17 m E	8739303,81 m S
SEV25	24 L	203179,57 m E	8732727,34 m S
SEV26	24 L	204383,73 m E	8730507,18 m S

Na Figura 5.11, a seguir, mostra-se o comportamento mais comum das SEVs realizadas na área piloto do Riacho do Juá e sua comparação com SEVs realizadas por Feitosa (1975).



**Figura 5.11: Tipo de SEV mais comum sobre a Formação Salitre.**

As SEVs realizadas sobre a Formação Salitre, na área piloto do Riacho do Juá mostram geralmente quatro horizontes elétricos principais. É possível propor um significado geológico desses horizontes, com base no conhecimento da geologia de superfície, em dados de poços e em dados hidroquímicos, conforme indicado a seguir:

- Horizonte 1 – Horizonte eletricamente resistivo atribuído ao solo seco.
- Horizonte 2 – Horizonte eletricamente condutivo que inclui o solo argiloso de decomposição do calcário, úmido ou saturado, e a porção superior dos calcários mais intensamente carstificada e saturada. Esperava-se, de início, que as maiores condutâncias<sup>3</sup> desse horizonte traduzissem maiores espessuras da zona saturada dos calcários, refletindo assim melhores condições aquíferas. A análise de informações hidroquímicas dos poços Siagas, entretanto, mostra que a salinidade das águas desempenha importante papel no condicionamento dessas condutâncias. Na Figura 5.12 observa-se que os valores da condutância longitudinal crescem para noroeste, na direção de Uibaí, onde predominam altas salinidades das águas dos poços e crescem, ainda para mais longe, na direção do poço 01-CL-1-BA, na estrada Central –

<sup>3</sup> Condutância longitudinal é um dos dois parâmetros de Dar Zarrouk. É definida como a razão entre a espessura de uma camada eletricamente condutiva e sua resistividade verdadeira.

Hidrolândia, onde os calcários são salinizados até cerca de 200 metros de profundidade. De acordo com as SEVs representativas mostradas na Figura 5.12, vamos considerar, em princípio, a condutância de 1,0 mho como limite de separação entre zonas salinizadas e zonas de águas aceitáveis. SEVs que exibam condutâncias muito maiores que 1,0 mho devem corresponder a águas salinizadas, enquanto que SEVs onde a condutância seja menor que 1,0 mho indicam águas de qualidade aceitável. Como corolário deste raciocínio, verifica-se que as resistividades aparentes tomadas com AB de 200 metros (AB/2 de 100 metros) dependem do valor da condutância longitudinal do horizonte 2. Assim, em presença de água muito salinizada, essas resistividades aparentes são muito baixas, a exemplo do que acontece na SEV 1 e na SEV do poço CL-1-BA-01 (Figura 5.12) que se situam no setor salinizado de Uibaí/Central/Hidrolândia. Em presença de água não salinizada, por outro lado, as resistividades aparentes tomadas com AB de 200 metros (AB/2 de 100 metros) são muito elevadas, como nas demais SEVs da Figura 5.12.

- Horizonte 3 – Horizonte eletricamente resistivo, constituído pelo conjunto dos calcários compactos da Formação Salitre, pouco carstificados ou não carstificados. A má caracterização elétrica do horizonte 4, abaixo discutida, implica na má individualização elétrica do horizonte 3. Este horizonte, com efeito, é bem individualizado apenas em 4 SEVs (SEVs 7, 18, 19 e 20) e mal esboçado em três outras (SEVs 4, 14 e 26).
- Horizonte 4 – Possante horizonte eletricamente condutivo, constituído pelo conjunto de sedimentos não calcíferos compreendidos entre a base da Formação Salitre e o topo dos quartzitos do Grupo Chapada Diamantina. Esses sedimentos incluem, provavelmente, siltitos e argilitos da Formação Bebedouro e, talvez, espessas sequências de argilitos da Formação Lençóis. Misi, A. & Souto P. (1975) in Feitosa (1975) apresentam várias colunas estratigráficas levantadas em pontos da borda da Bacia de Irecê. Reproduzimos aqui uma dessas colunas, no extremo sul da bacia (Figura 5.13), onde se pode verificar a ocorrência de um espesso pacote de argilitos na base dos calcários Salitre. Em outros quatro locais onde aflora a base do Salitre, observam-se também significativas espessuras de metapelitos. Dessa forma, considera-se verossímil atribuir o horizonte elétrico 4 a esses sedimentos, quer se tratem eles de fácies argilosas da Formação Bebedouro, quer constituam a Formação Lençóis. O comprimento de linha AB de envio de corrente que foi previsto em nossa proposta, decorrente de informações do TR, não foi suficiente para ultrapassar eletricamente esse horizonte. Sua presença, portanto, é detectada em apenas algumas SEVs e mal esboçada em outras tantas.

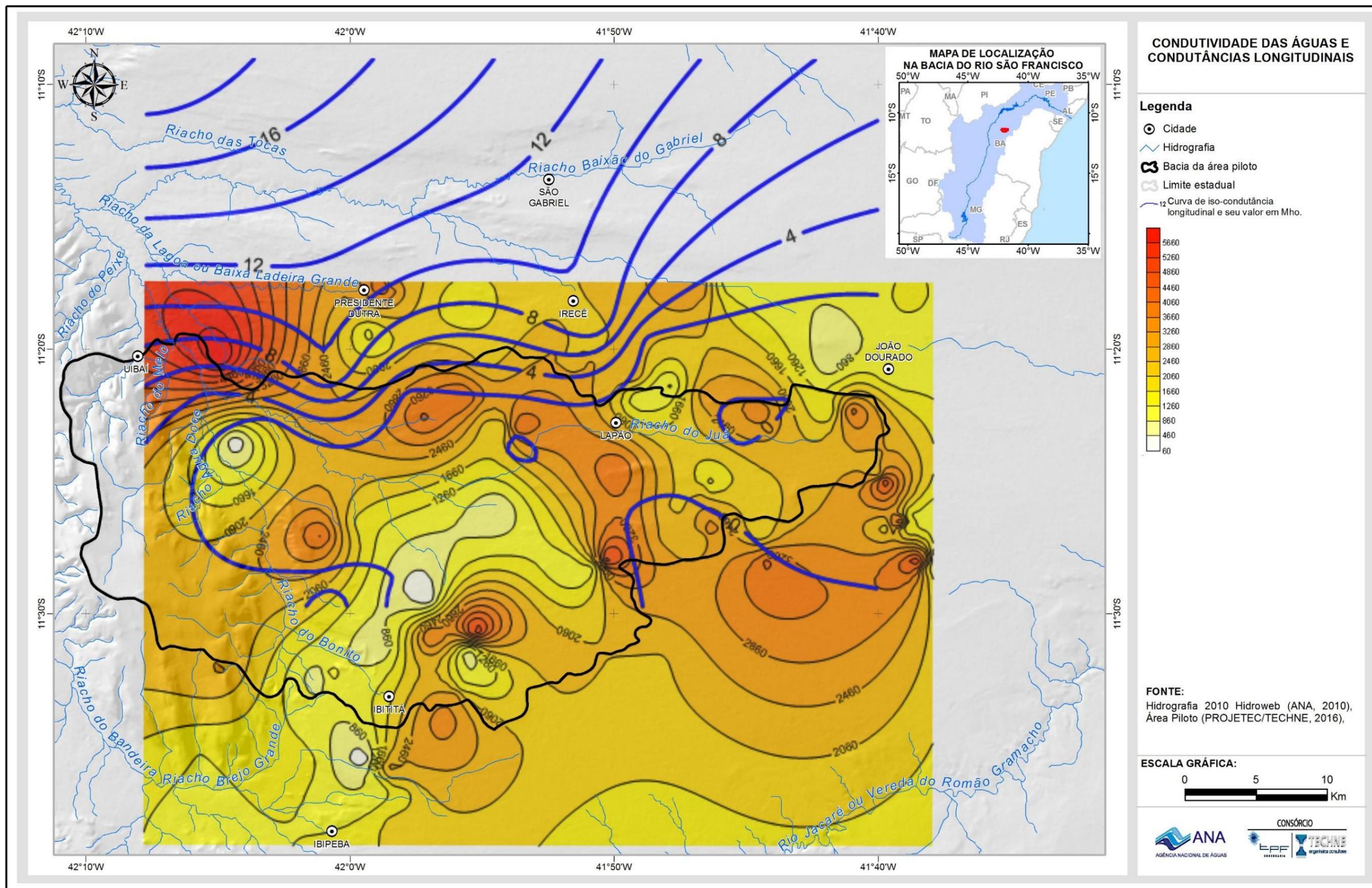
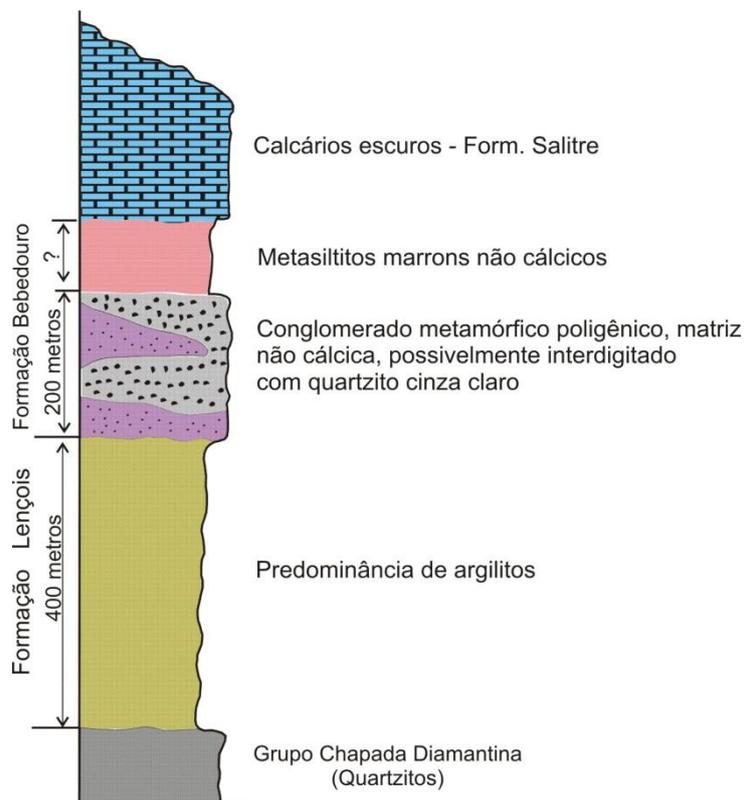


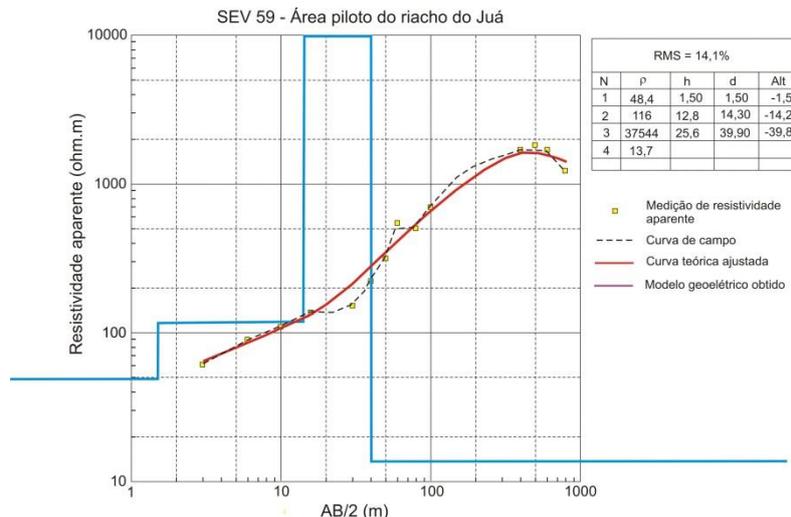
Figura 5.12: Condutividade das águas e condutâncias longitudinais.



**Figura 5.13: Coluna estratigráfica no extremo sul da Bacia de Irecê, na região de Cocho do Moleiro/Palmeiras. Modificado de Misi, A. & Souto P. (1975) in Feitosa (1975).**

Inclui-se na Figura 5.11 a SEV 18 OESA/CONESP obtida por Feitosa (1975) na BA-052 (Estrada do Feijão), 43 km a ESE de Irecê. Nesta SEV, realizada com linha AB de 10 km, toda a sequência elétrica aparece bem caracterizada, incluindo o horizonte elétrico 4 e o topo dos quartzitos do Grupo Chapada Diamantina. É tecnicamente possível, assim, uma investigação mais profunda da Bacia de Irecê que aquela feita no estudo em análise.

Mostra-se, no Anexo 13.6, o conjunto de SEVs realizadas na área piloto do Riacho do Juá. 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 inversão. 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 geológico, o qual é mostrado, em termos numéricos, na tabela apresentada no lado direito das curvas. A Figura 5.14 a seguir mostra um exemplo de SEV interpretada.



**Figura 5.14: Exemplo de SEV interpretada.**

### 5.2.1.2 Perfis de resistividade

O meio cárstico é fisicamente heterogêneo. Sua heterogeneidade é tanto maior quanto mais carstificado esse meio for, atingindo intensidades máximas em presença de espaços vazios significativos, tais como canais de dissolução e cavernas. É de se esperar, assim, que a heterogeneidade física dos calcários acarrete uma correspondente heterogeneidade elétrica que pode ser quantificada em caminhamentos elétricos convenientemente programados e executados<sup>4</sup>.

O comportamento elétrico dos calcários foi estudado em diversos trabalhos anteriores. (Feitosa, 2004) ao estudar os calcários Jandaíra na região da Bacia Potiguar, propôs um índice que pretende quantificar a variabilidade elétrica da rocha. Esse índice foi designado de índice de carstificação (Feitosa, 2004).

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 clássico ( $\Omega^2.m^2$ ). Esta variante utiliza, como peso, a resistividade aparente da estação considerada. Sua utilidade 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. A expressão utilizada, válida para perfis lineares, é a seguinte:

$$IC_i = [(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j|) \cdot \rho_i] / 2 \quad (1)$$

- Índice de classificação 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

<sup>4</sup> A heterogeneidade elétrica se mantém quer os espaços vazios estejam secos ou saturados. Mudam apenas os contrastes de resistividade, de uma situação para a outra.

variabilidade elétrica traduza heterogeneidades unicamente nesse tipo de rocha. A expressão utilizada, válida para perfis lineares, é a seguinte:

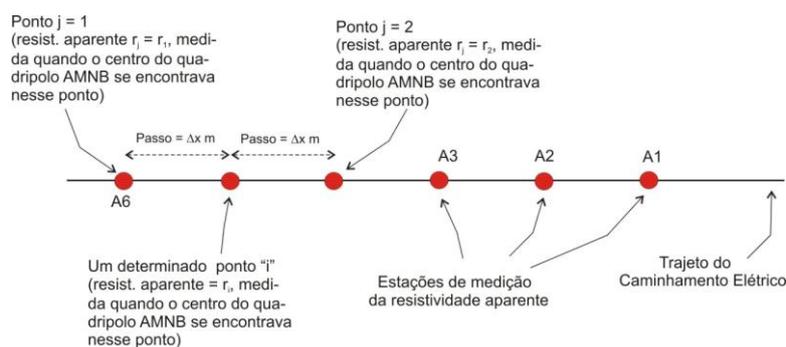
$$IC_i = [(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j|)]/2 \quad (2)$$

- **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:

$$IC_i = \{[(\sum_{j=i+1}^{i-1} |\rho_i - \rho_j|)/2]/\rho_i\} \cdot 100 \quad (3)$$

- **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 %.

A figura 5.15 a seguir ilustra o esquema operacional dos perfis de resistividade destinados à avaliação do índice de carstificação.



**Figura 5.15: Ilustração do esquema para obtenção do IC.**

Nas expressões do índice de carstificação (1), (2) e (3), acima mostradas, as variáveis têm os seguintes significados (ver Figura 5.15 para maior clareza):

$IC_i$  = Índice de carstificação na estação de medição i.

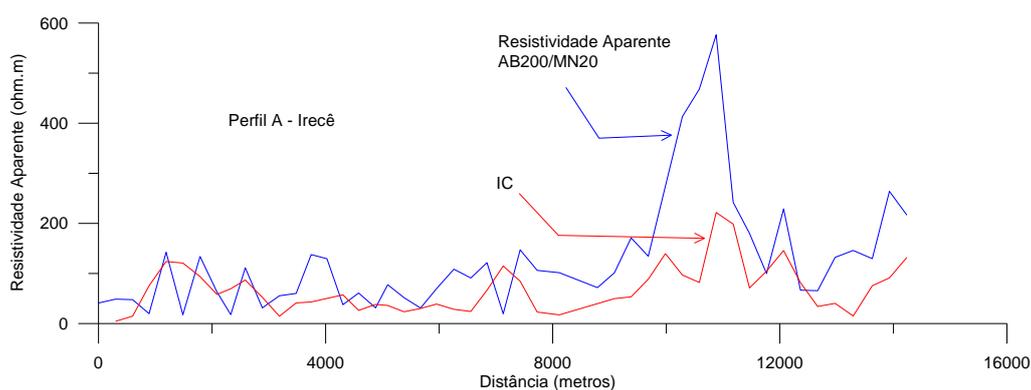
$\rho_j (j=i-1)$  = Resistividade aparente na estação de ré em relação à estação i.

$\rho_j (j=i+1)$  = Resistividade aparente na estação de vante em relação à estação i.

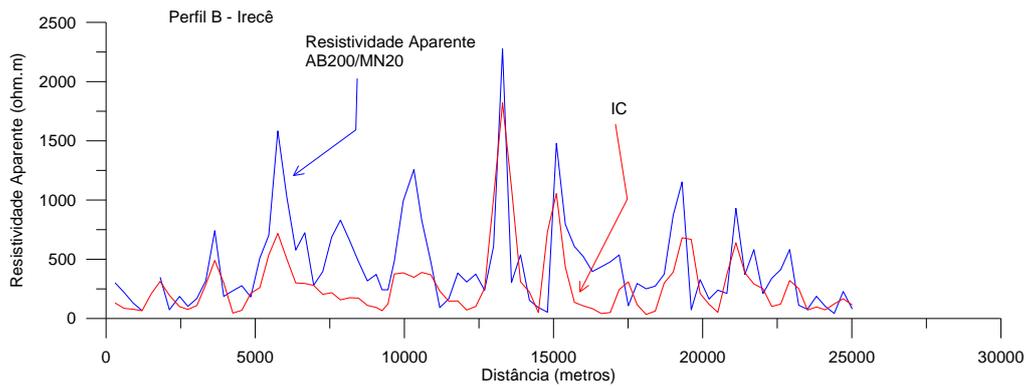
Foram realizados quatro perfis de resistividade na área piloto do Riacho do Juá. Esses perfis objetivaram a avaliação do índice de carstificação da porção superior dos calcários Salitre. Suas posições são mostradas na Figura 5.16, enquanto que os perfis, em si, são apresentados adiante nas figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20. Nessas figuras apresentam-se as curvas de resistividade aparente e as curvas do índice de carstificação.



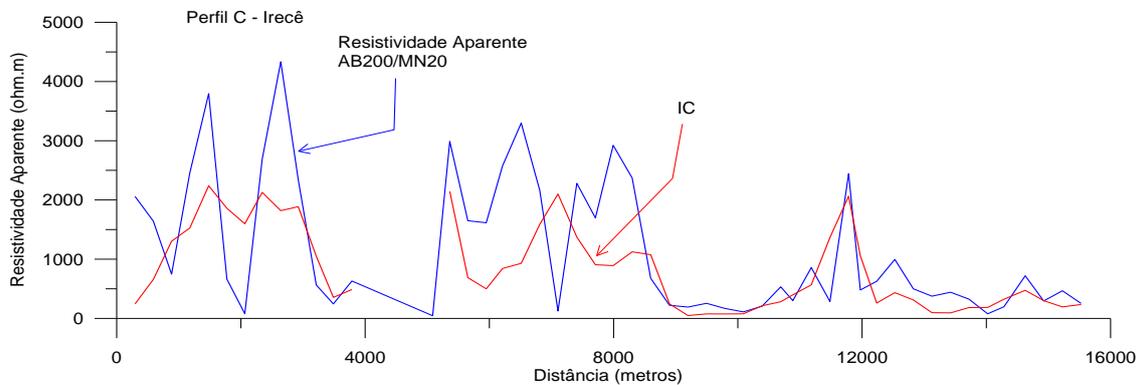
**Figura 5.16:** Posição dos perfis de resistividade na área piloto do Riacho do Juá.



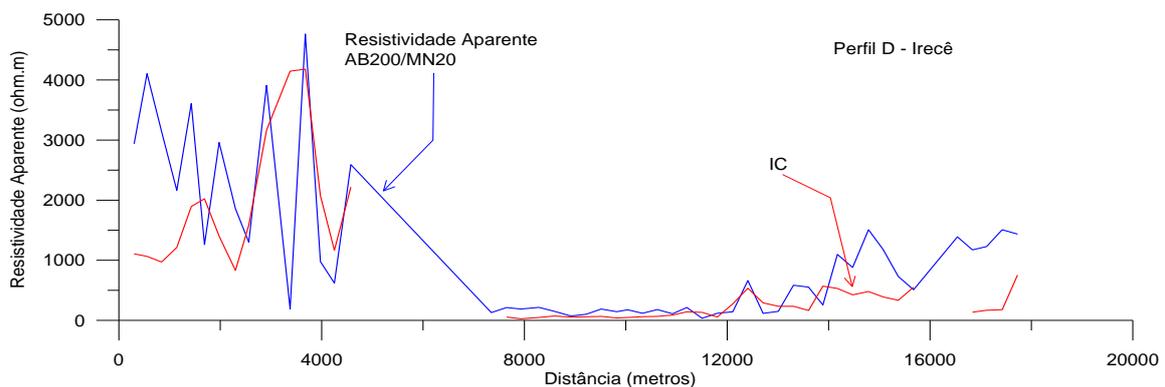
**Figura 5.17:** Perfil de resistividade A.



**Figura 5.18: Perfil de resistividade B.**



**Figura 5.19: Perfil de resistividade C.**



**Figura 5.20: Perfil de resistividade D.**

A linha AB de 200 metros (AB/2 de 100 metros) utilizada provê a varredura lateral de uma fatia do terreno com cerca de 40 a 50 metros de espessura. De acordo com o comportamento elétrico do horizonte 2 das SEVs, discutido

acima, os valores de resistividade aparente medidos nesses perfis admitem os seguintes significados:

- Resistividades aparentes altas, acima de 500 ou 1000 ohm.m, são compatíveis com rochas calcárias saturadas com água não salinizada. Presume-se que a intensidade da variabilidade elétrica ao longo do perfil (índice de carstificação), nessas condições, é diretamente proporcional à intensidade de carstificação da rocha.
- Resistividades aparentes baixas, menores que 500 ohm.m, são compatíveis com rochas calcárias saturadas com água mais salinizada. A análise dos perfis sugere que, nesses casos, 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. Em termos mais simples, a presença de água muito salinizada nos calcários pode comprometer o poder da eletrorresistividade como detector de estruturas carsticas.
- O comportamento elétrico acima discutido, provendo uma distinção entre zonas salinizadas e zonas não salinizadas, é bem-vindo quando se trata de locação de poços.
- Ele pode representar, contudo, uma limitação da eletrorresistividade, quando se trata de mapear carsts, por exemplo, para avaliação de áreas de risco geotécnico.

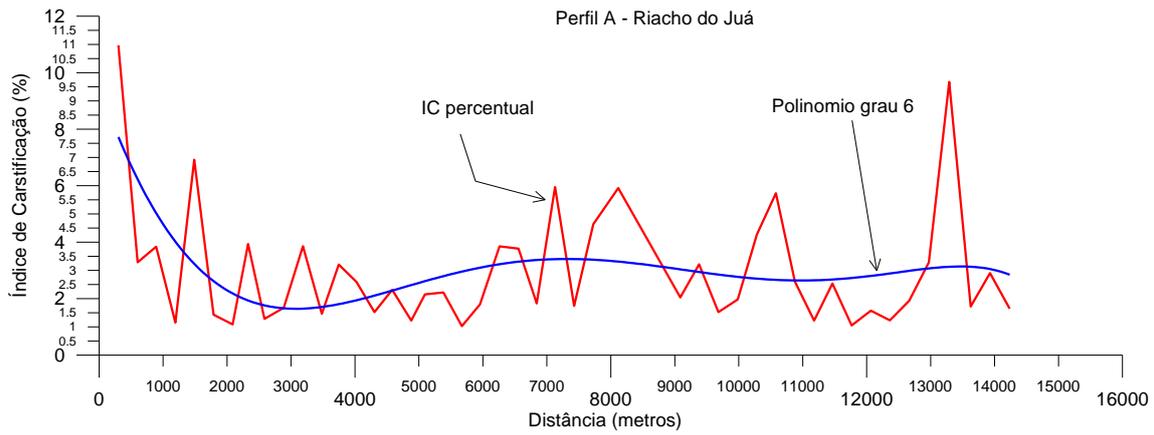
Em face da argumentação acima, julgou-se conveniente expressar o índice de carstificação de uma forma que minimizasse a atenuação da expressão da variabilidade elétrica, atenuação esta causada pela forte componente eletrolítica da condutibilidade elétrica das rochas (Porto Lira, 2001). Para atingir esse objetivo foi adotado o seguinte procedimento:

- O índice de carstificação simples (IC)<sup>5</sup>, avaliado como acima mostrado, foi expresso como um percentual da resistividade aparente. Este novo índice de carstificação pode ser chamado de IC%. Seus valores numéricos, mais significativos, amplificam a expressão da variabilidade elétrica em zonas muito condutivas.
- Foram ajustados polinômios de grau 6 aos quatro perfis de IC% elaborados. Os polinômios suavizam os perfis, eliminando variações abruptas localizadas, e mostram as variações mais significativas, regionalmente, do IC%. Este terceiro índice pode ser chamado de IC polinomial.

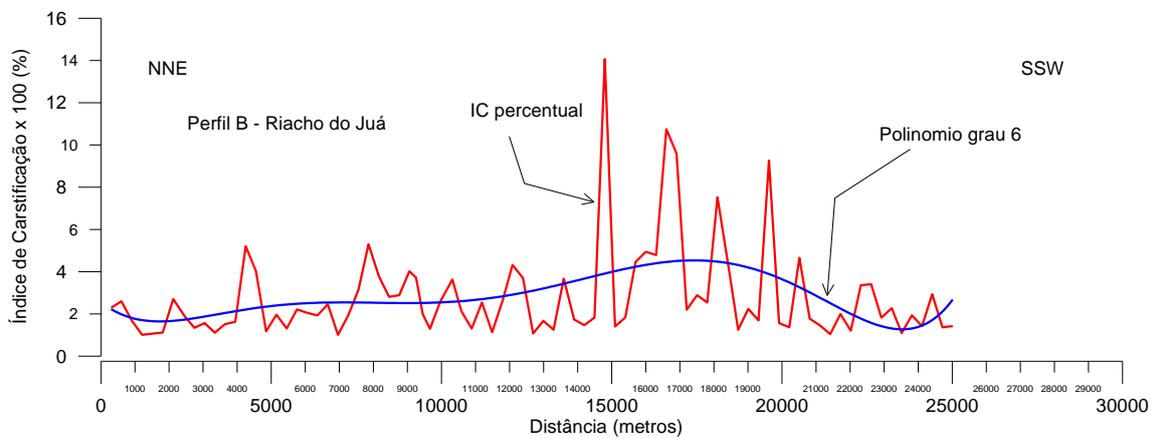
As figuras 5.21, 5.22, 5.23 e 5.24, a seguir, mostram os perfis do IC% com os respectivos polinômios ajustados.

---

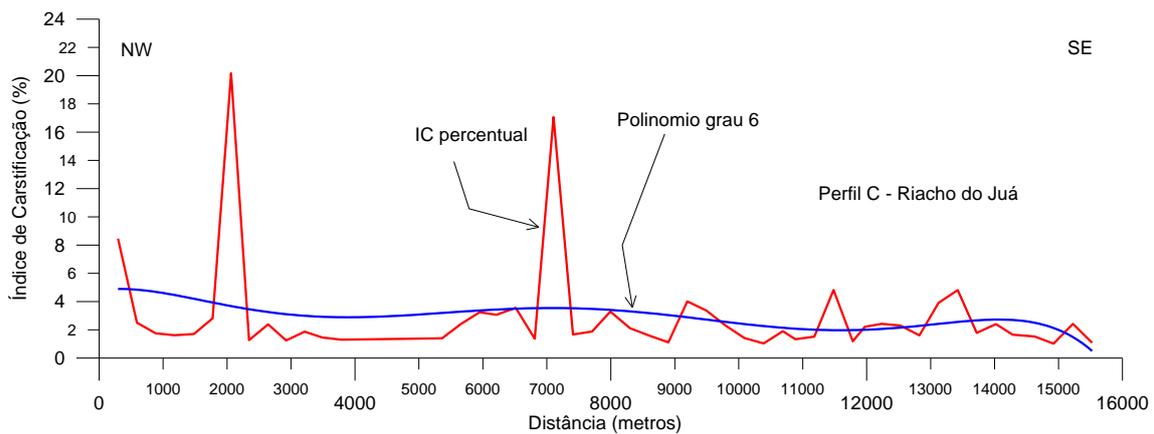
<sup>5</sup> Vamos nos referir ao índice de carstificação original como “índice de carstificação simples” para distingui-lo dos outros índices de carstificação que serão avaliados.



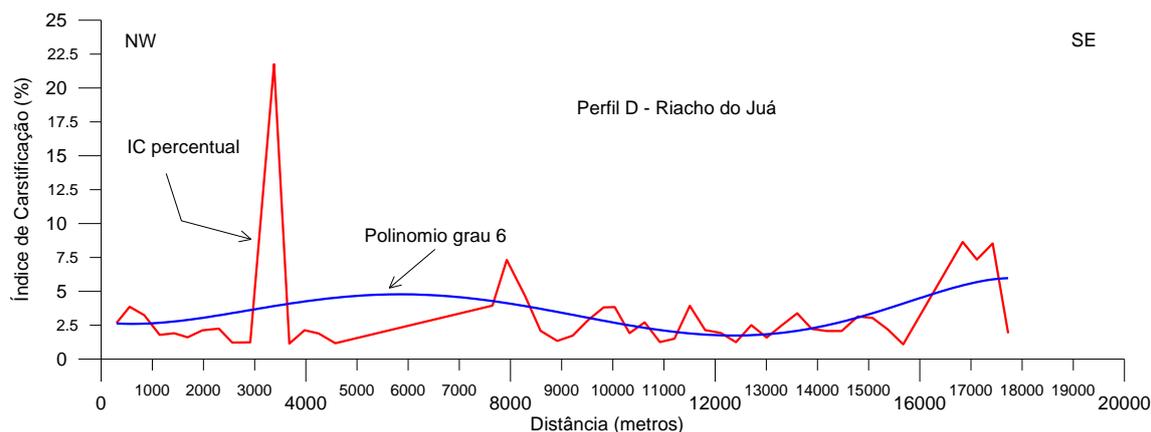
**Figura 5.21: Perfil de IC% A.**



**Figura 5.22: Perfil de IC% B.**



**Figura 5.23: Perfil de IC% C.**



**Figura 5.24: Perfil de IC% D.**

### 5.2.1.3 Zoneamentos dos índices de carstificação

As figuras 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28, na sequência, mostram, respectivamente, os zoneamentos de resistividade aparente, do IC simples, do IC% e do IC polinomial percentual. A discussão desses zoneamentos será apresentada adiante.

Conforme discutido acima, resistividades aparentes altas, acima de 500 ou 1000 ohm.m, são compatíveis com rochas calcárias saturadas com água não salinizada, enquanto que resistividades aparentes baixas, menores que 500 ohm.m, são compatíveis, em princípio, com rochas calcárias saturadas com água mais salinizada. Embora esta seja a hipótese mais provável para explicar as baixas resistividades, a possibilidade de ocorrência de rochas mais pelíticas não está fora de cogitação.

O canto nordeste do mapa de resistividade (Figura 5.25), delimitado pela curva de 1230 ohm.m, surge como uma zona de altas resistividades, com valores que chegam a 2430 ohm.m. Esta é a área situada entre Lapão e Gameleira.

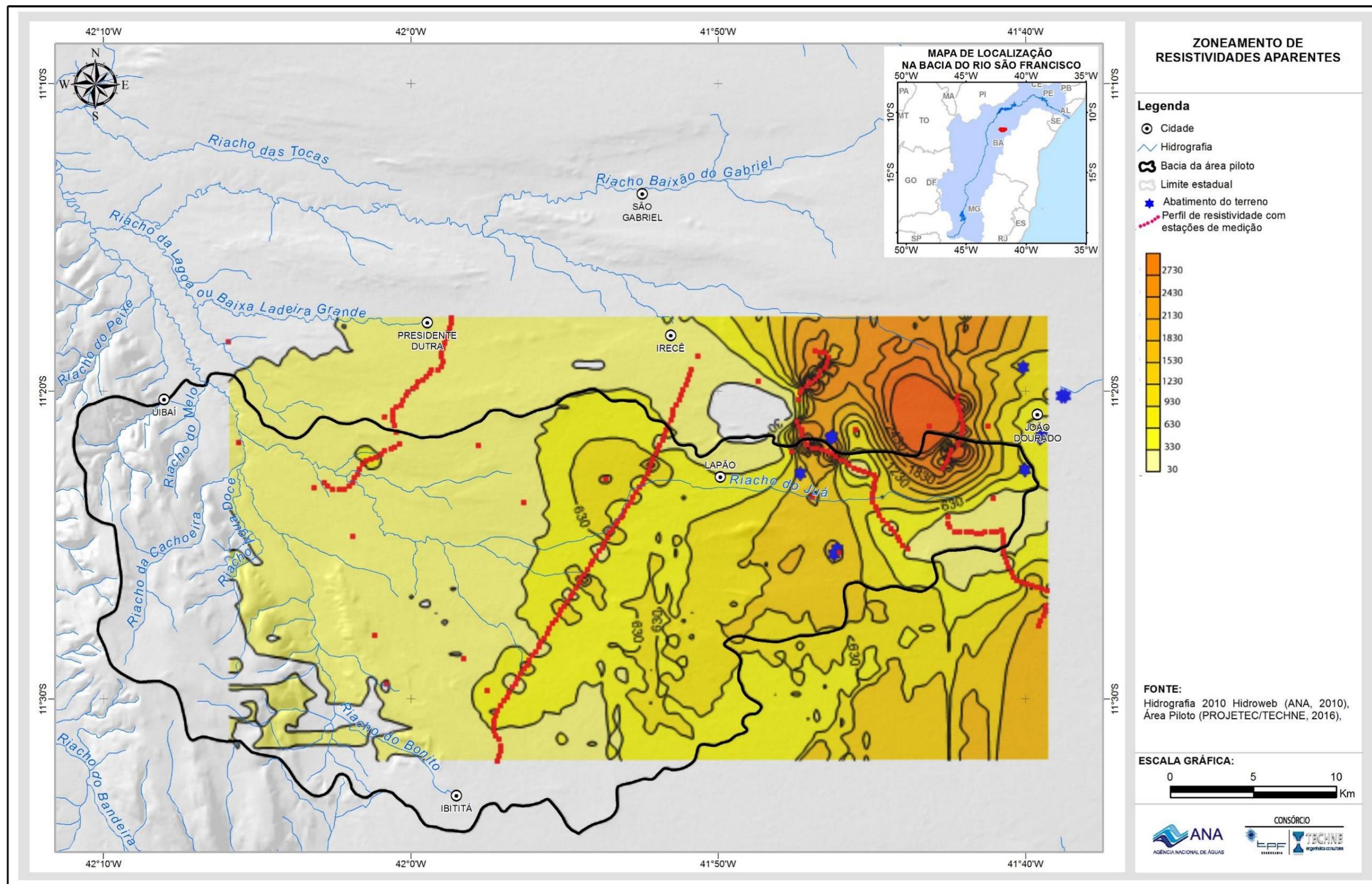


Figura 5.25: Zoneamento de Resistividades Aparentes.

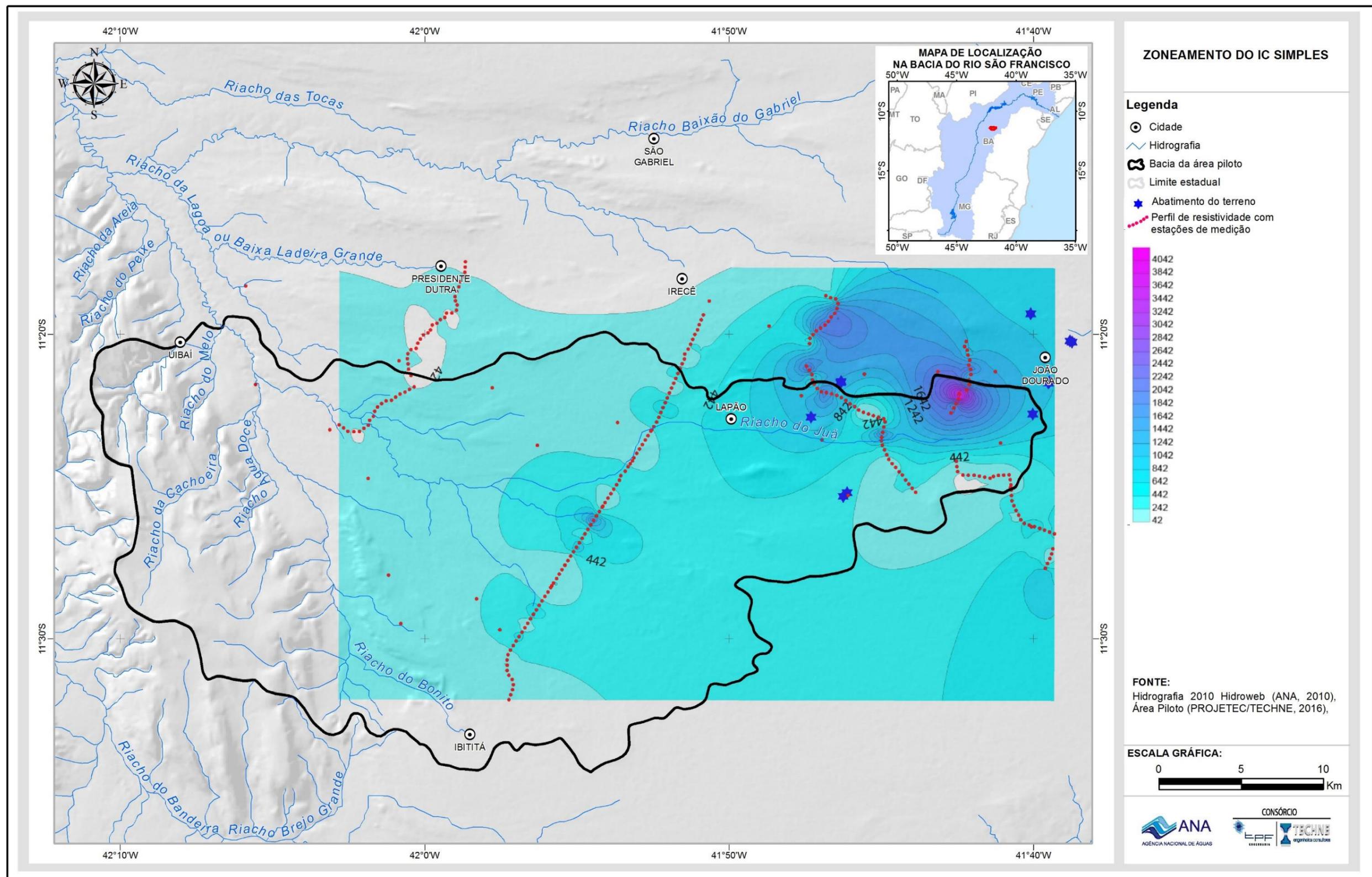


Figura 5.26: Zoneamento do IC simples.

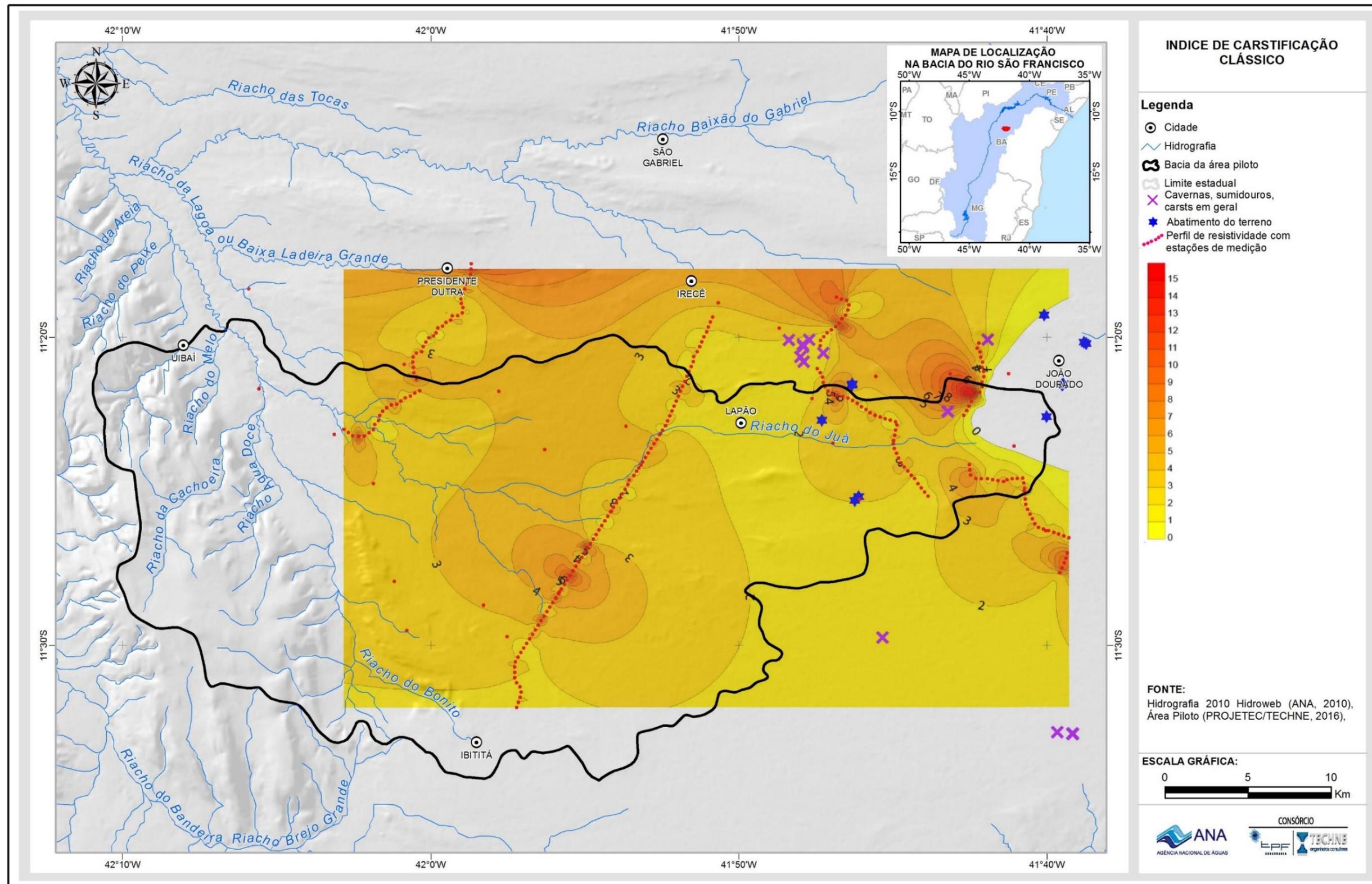


Figura 5.27: Zoneamento do IC%.

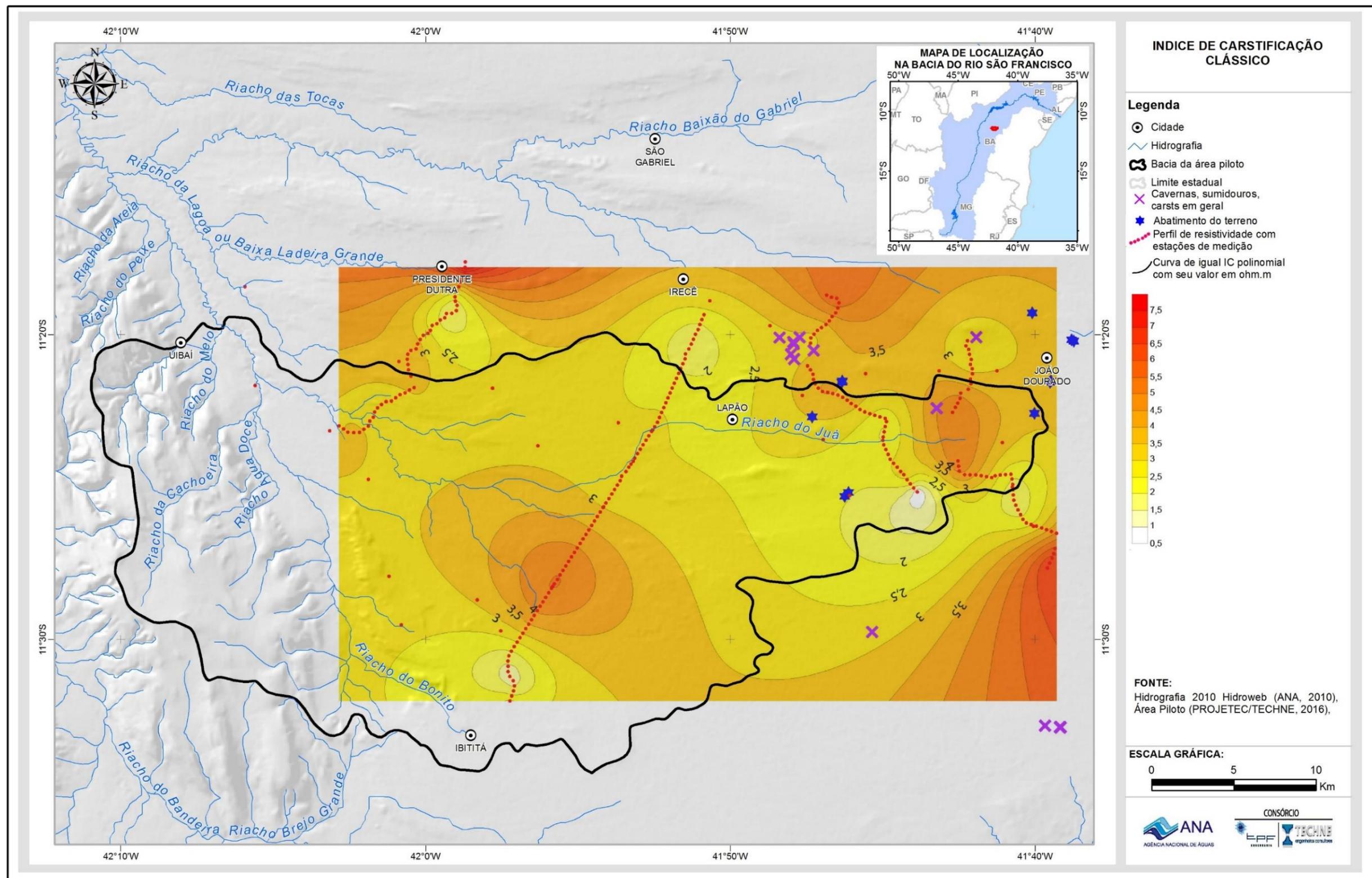


Figura 5.28: Zoneamento do IC polinomial.

Os zoneamentos acima mostrados permitem verificar o seguinte:

- A salinidade das águas subterrâneas da Formação Salitre aumenta na direção noroeste, conforme mostrado na Figura 5.12.
- Dada essa variação da salinidade das águas, e como acima discutido, os zoneamentos que fornecem melhores informações sobre as propriedades aquíferas dos calcários são os seguintes: (a) zoneamento do índice de carstificação percentual (Figura 5.27); (b) zoneamento desse índice previsto por polinômios de grau 6 (Figura 5.28).
- Esses documentos sugerem, no âmbito da bacia hidrográfica do riacho do Juá, dois alinhamentos NW-SE de alta variabilidade elétrica. Um deles passa imediatamente a nordeste de Ibititá, enquanto que o outro passa entre Gameleira e Lapão. Veremos adiante, no item 5.2.2, que os estudos de detalhe realizados em Lapão confirmam esse alinhamento NW-SE além de evidenciarem um outro na direção NE-SW.
- A região entre Gameleira e Lapão, em particular, apresenta-se eletricamente como a mais carstificada de toda a bacia do riacho do Juá, conforme observado nas figuras 5.25 a 5.27. Esse resultado confirma os estudos de Beraldo (2006). Essa maior carstificação parece se desenvolver, preferencialmente, nos ritmitos da Unidade Nova América da Formação Salitre.
- Chama a atenção nos mapas das figuras 5.27 e 5.28 um pronunciado alinhamento E-W de alta variabilidade elétrica. Esse alinhamento, confirmado no estudo de Lapão, parece ser constituído de carstificações desenvolvidas em altas cotas, ao longo do flanco sul do divisor de águas entre a bacia do riacho do Juá e as drenagens associadas ao Riacho Baixão do Gabriel.

### **5.2.2. Detalhamento da área de Lapão**

Lapão é uma sede municipal com 27.338 habitantes (IBGE, 2010) situada 10,0 km a sudeste de Irecê, sobre calcários da Formação Salitre. Há vários anos a zona urbana de Lapão vem sofrendo problemas de rachaduras do solo e de construções provocados pelo comportamento cárstico dos calcários. O estudo geofísico de detalhe por eletrorresistividade, cujos resultados são aqui apresentados, foi programado e realizado com o objetivo de fornecer subsídios para a elaboração do mapa de risco geotécnico da área de Lapão. A área selecionada para o estudo geofísico, mostrada na Figura 5.29, mede 22,0 km<sup>2</sup>.

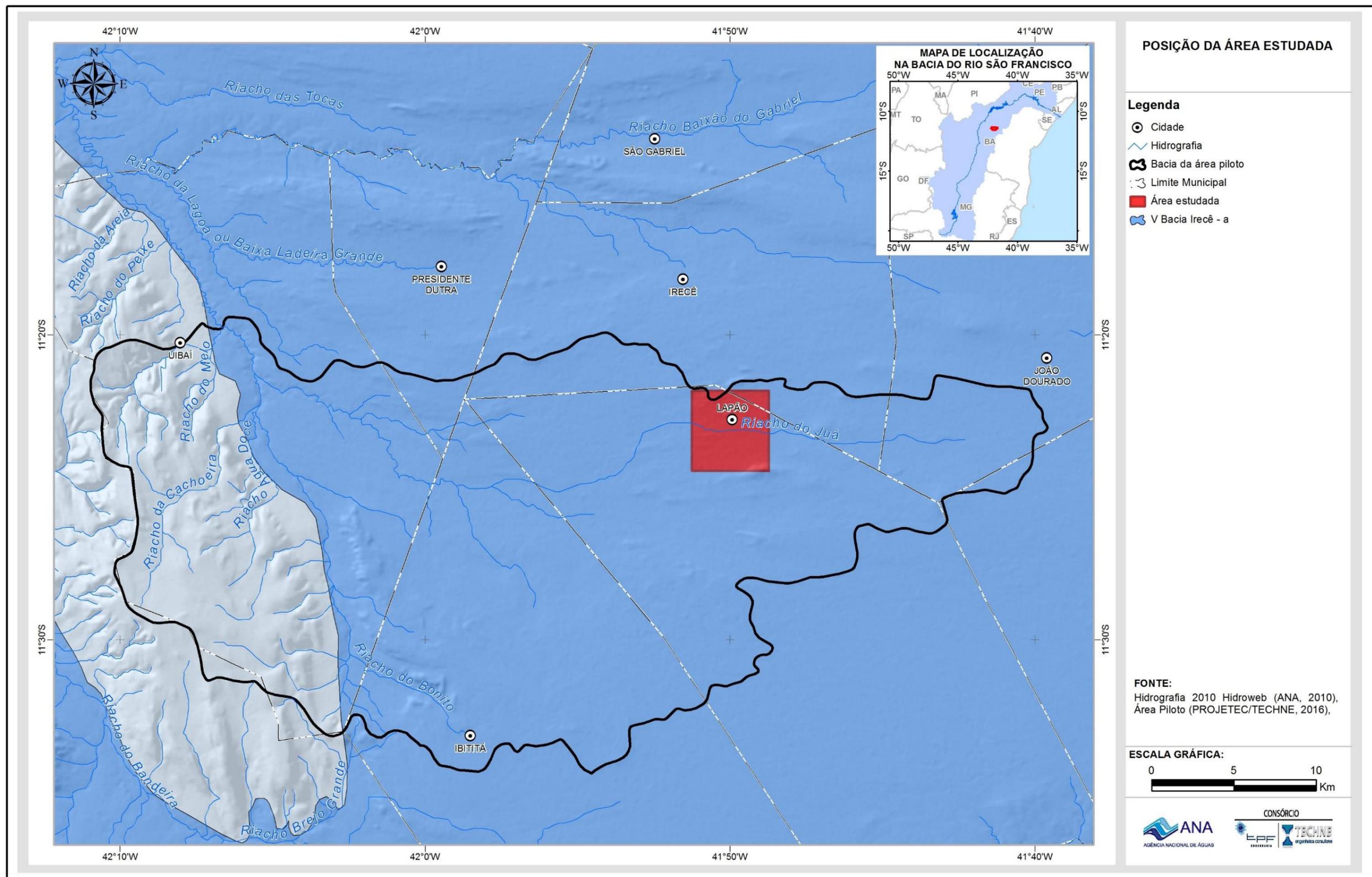


Figura 5.29: Posição da área estudada.

### 5.2.2.1 Abatimentos do terreno e estudos anteriores

Segundo Dias Neto & Maia (2009) o problema dos abatimentos de terreno em Lapão se tornou ostensivo em outubro de 2008. De acordo com esses autores, o fenômeno teve início na Fazenda Sete Cascas situada a 1,7 km a leste da cidade de Lapão. As orientações das subsidências e rachaduras, medidas em campo, refletem um padrão E-W de falhamento ao longo do eixo axial com uma pequena inflexão na direção NW-SE. Algumas rachaduras apresentam largura de 5 a 40 cm. Acompanhando a extensão dessas aberturas ocorrem de forma localizada, sumidouros cuja extensão é de cerca de 50 cm (Figura 5.30).

Rachaduras semelhantes são descritas na Fazenda do Juá, situada cerca de 500 m a sul da Fonte do Lapão. As rachaduras na Fazenda Juá, descritas por Maia *et al* (2010) como um dos maiores eventos de colapso ocorridos no município de Lapão, apresentam padrões semelhantes aos da Fazenda Sete Cascas, mas com uma extensão maior e com as fendas variando entre 20 a 50 cm de largura (Figura 5.31). Na entrada da propriedade, pequenos pontos de abatimento, rasos e com geometria subarredondada, estão alinhados até a região central do terreno onde as fendas passam a ser retas e contínuas, com largura de cerca de 20 a 40 cm aproximadamente. Orientações dessas fissuras medidas em campo seguem um padrão norte-sul. Nas proximidades da Fazenda Juá, no Bairro Ida Cardoso, surgiram sumidouros simultaneamente às fendas. Os sumidouros são alinhados com fendas abertas que expõem calcissiltitos da Unidade Nova América. As orientações das fendas são variáveis.

Surgiram também, em uma rua da cidade, rachaduras que atingiram, localmente, até 20 cm de largura. Essas rachaduras afetaram seis casas e acarretaram subsidência do terreno com até 15 cm de rejeito. De acordo com Dias Neto & Maia (2009) o desenvolvimento das fissuras teria se dado de leste para oeste, tendo atingido o centro da cidade no espaço de um mês. Em 2009 foram registradas novas subsidências na localidade de Tanquinho, 6 km a oeste da cidade de Lapão.

Azevedo, (2013) descreve que a causa mais provável dos abatimentos teria sido o rebaixamento do nível d'água do freático.

Sampaio & Santos (2009) e Santos *et al* (2009) realizaram, respectivamente, estudos gravimétricos e de eletrorresistividade. Os primeiros foram realizados no período de 12 a 23/11/2008, em parceria com a CBPM, tendo sido utilizada a técnica da microgravimetria em que o espaçamento das estações gravimétricas chegou a 2 metros. Os estudos por eletrorresistividade foram realizados na mesma época, em parceria com a mineradora Galvani Indústria Comércio e Serviços S.A.

Dias Neto & Maia (2009) verificaram que a direção predominante das rachaduras é NW-SE, coincidente com uma das direções proeminentes de fraturamento das rochas calcárias e recomendaram monitoramento contínuo dos níveis de água, além de estudos e controle da exploração do Aquífero Salitre.

Maia *et al* (2010) informam que as direções NO-SE, NE-SO e NNE-SSO das fraturas na área de Lapão são concordantes com as fissuras formadas nos

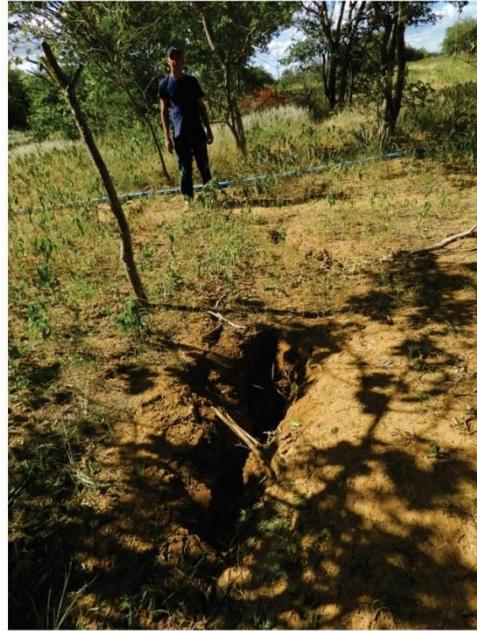
abatimentos de terreno ocorridos. Segundo esses autores, as cavernas e condutos subterrâneos identificados no levantamento geofísico por gravimetria apresentam alinhamentos coincidentes com as direções das estruturas rúpteis abertas. Em sua interpretação, feições de baixos gravimétricos estariam associadas com colapsos e subsidências na área urbana de Lapão.

Oliveira Filho & Bispo I. (2015) identificaram zonas de influência dos afundamentos e apresentaram uma Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão, na escala de 1:10.000, para auxiliar a administração municipal no planejamento e expansão urbana da cidade. Três classes de aptidão à urbanização foram consideradas: Alta Aptidão à Urbanização; Média Aptidão à Urbanização; e Baixa ou Inexistente Aptidão à Urbanização.

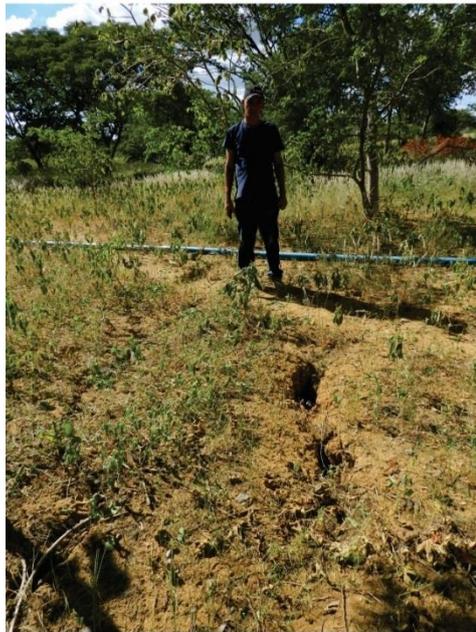
Lins *et al* (2015), formularam hipótese na qual a formação de uma dolina, atualmente em curso, na região da Fazenda do Gildásio, teria provocado movimentação centrípeta lateral do solo. Essa movimentação teria provocado, à distância, rachaduras do solo tais como as que ocorreram nas vizinhanças da Fonte do Lapão e no bairro Ida Cardoso.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 5.30: Fazenda 7 Cascas, ponto J-008G. (a) Sumidouro presente de forma pontual e localizada ao longo das aberturas; Fendas variam de acordo com a largura. Variam entre 50 cm (c) a menos de 10 cm (d).**



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 5.31: Fazenda Juá, ponto J-002G. (a) Abatimentos alinhados na entrada da propriedade; (b) Fendas contínuas no solo com orientação N-S; (c) Rachaduras localizadas no centro da propriedade com orientação E-W; (d) Rachaduras próximas à sede da propriedade.**

Além das ocorrências na área urbana e periurbana de Lapão, nos anos de 2008 e 2009, outras mais antigas e isoladas foram registradas em fazendas de irrigação localizadas no município de Lapão.

Um bom exemplo é o da Fazenda Goiás, no povoado de Bonzão. Segundo relato do proprietário surgiu, há quinze anos, um sumidouro que fez perder um poço tubular e sua bomba, que vinham até então funcionando normalmente. Hoje, existe outro poço perfurado cerca de 200 metros a NE do anterior, que é utilizado na irrigação de cenoura, tomate e pinha. O sumidouro apresenta

orientação E-W, concordante com os planos de acamamento cuja atitude é 95Az/56°. Existem fraturas abertas nos azimutes 15Az, 30Az e 20Az.

Na Fazenda Lagoa dos Patos 1, no Povoado de Lagoa dos Patos, a SE de Lapão, o processo de subsidência é evidente, denunciado por fissuras e abatimentos do terreno. Nos arredores da propriedade uma fissura orientada 350 Az se iniciou ao longo de uma estrada vicinal que dá acesso a outras fazendas do povoado (Figura 5.32). Essa fissura é periodicamente aterrada para evitar acidentes na estrada. Sua largura é de cerca de 30 cm. O solo é bastante espesso na área, apresentando uma coloração amarronzada e uma textura areno-argilosa. Na propriedade, as fissuras são contínuas com ocorrências pontuais de pequenos colapsos, cuja largura varia de 40 cm a 1,5 metros. O padrão mais comum de orientação varia entre 55 a 60 Az. As fissuras seguem em direção a um poço tubular cadastrado, que foi alvo das duas coletas realizadas (Poço J-060P).

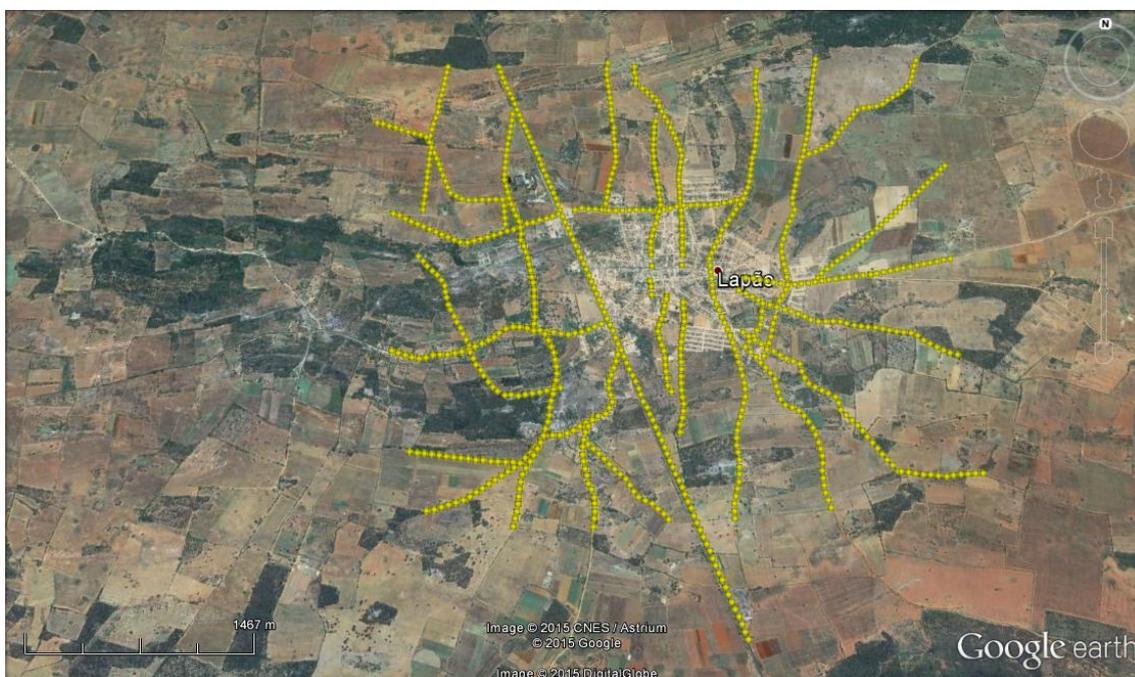


**Figura 5.32: Ponto J-006G, Povoado de Lagoa dos Patos. (a) Fissura ao longo da via que liga o centro urbano às propriedades; (b) Fissuras contínuas ao longo do terreno; (c) Colapsos pontuais associados a rachaduras; (d) Fissuras largas associadas com colapsos na direção do poço artesiano.**

### 5.2.2.2 Medições elétricas de detalhe em Lapão

Foram realizados perfis laterais de resistividade (caminhamentos elétricos), tendo sido utilizado o quadripolo linear simétrico de Schlumberger. O comprimento de linha AB de envio de corrente foi de 200 metros para um comprimento da linha MN de recepção igual a 20 metros. Foi adotado, ao longo dos perfis, um passo de 50 metros. Esse passo, aliado ao comprimento MN de 20 metros, ofereceu uma boa resolução na detecção das heterogeneidades elétricas buscadas, numa fatia de terreno da ordem de 15 a 30 metros de espessura. A linha AB utilizada foi definida com base na experiência obtida em estudos anteriores e com base na análise das SEVs realizadas anteriormente na área piloto do Juá, no âmbito do presente estudo do Carste São Francisco.

Foram realizados 42,0 km de perfis com um resistivímetro PER-80/PROEL. A posição dos perfis é mostrada na Figura 5.33 abaixo.



**Figura 5.33: Posição dos perfis realizados em Lapão. Os pontos amarelos são as estações de medição ao longo dos perfis.**

A abordagem representada pelo índice de carstificação foi aplicada à área de Lapão, visando à detecção e delimitação das zonas mais intensamente carstificadas, para fins de elaboração de um mapa de risco geotécnico.

### 5.2.2.3 Mapa do Índice de Carstificação

Foram elaborados e analisados mapas das três primeiras variantes do índice de carstificação, apresentadas acima no item 5.2.1.2. A variante que se mostrou mais adequada foi a do índice de carstificação simples cujo zoneamento é mostrado no mapa da Figura 5.34. O método de interpolação adotado foi o Kriging que é um dos mais flexíveis e precisos métodos de interpolação de curvas. Sua principal vantagem, no presente caso, é a compensação do efeito devido à aglomeração de valores, pela atribuição de

pesos menores aos valores da aglomeração. A principal desvantagem do Kriging é a extrapolação de valores além dos limites dos dados. No presente caso, entretanto, essa desvantagem manifestou-se mais nitidamente apenas na extremidade sul do perfil A (estrada Lapão – Canarana). No restante da área ela foi minimizada pela distribuição relativamente uniforme dos dados.

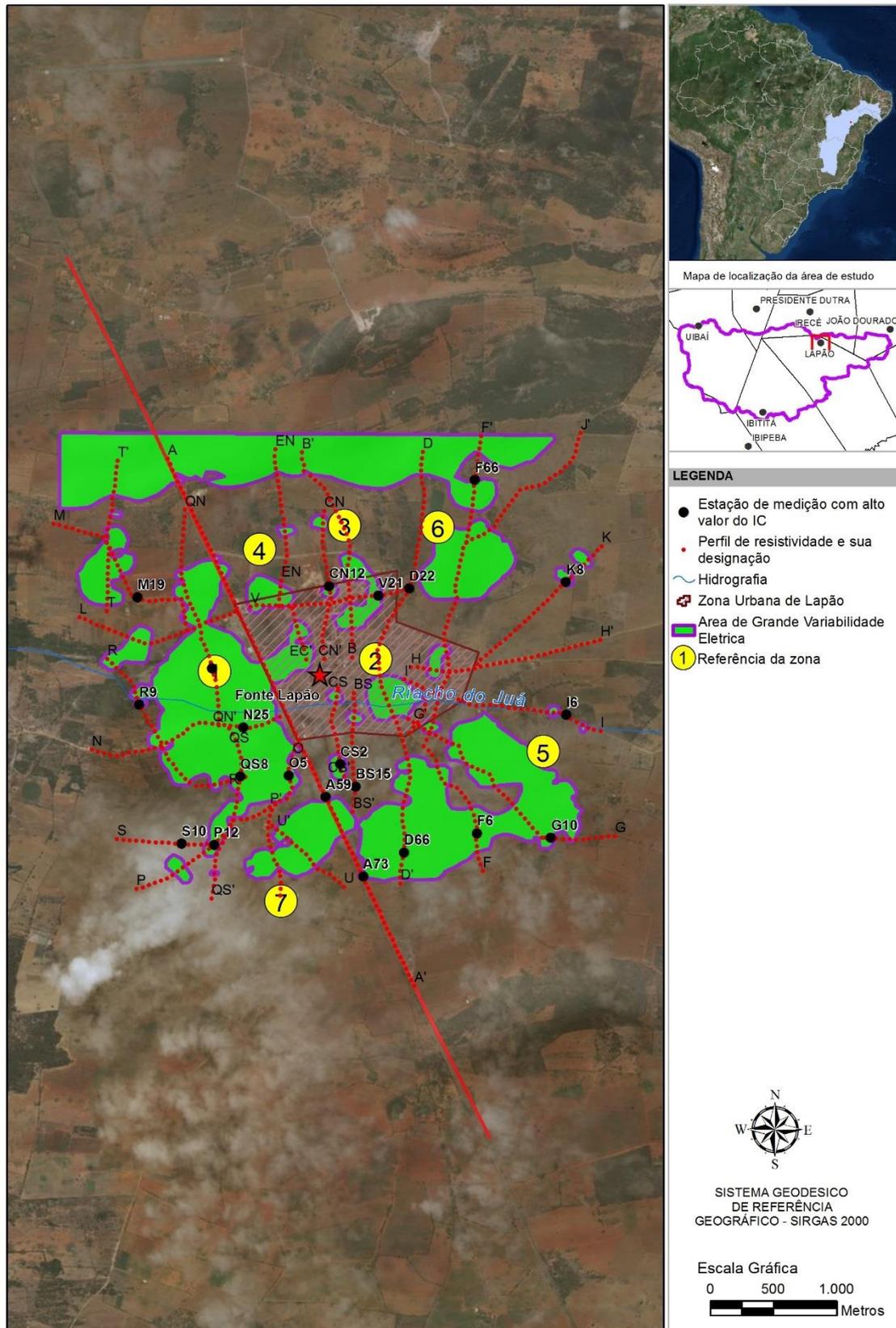
As curvas de igual IC, com equidistância de 25  $\Omega$ .m, são mostradas no mapa, com destaque para a curva de 75  $\Omega$ .m, considerada como referência. A análise dos perfis de resistividade individuais recomenda, com efeito, tomar esse valor como limite superior da variabilidade elétrica normal dos calcários da área. Admite-se, assim, que valores do IC superiores a 75  $\Omega$ .m passam a caracterizar uma variabilidade elétrica sugestiva de carstificação acentuada.

De acordo com as medições de nível d'água realizadas em março/2015, os níveis estáticos na área de Lapão ficam no entorno dos 30 metros. As SEVs realizadas na área de Lapão e em suas vizinhanças imediatas (SEVs 16, 17, 18, 19, 20 e 21)<sup>6</sup> sugerem que a presença do freático não é denunciada por diferenciações elétricas marcantes. Assim, não é possível saber se as resistividades aparentes medidas com AB de 200 metros, nos perfis, são ou não influenciadas pela zona saturada.

A interpolação das curvas de igual IC fez delinear, portanto, as zonas de alta variabilidade elétrica mostradas em verde e delimitadas pelas isolinhas de 75  $\Omega$ .m no mapa da Figura 5.34. Considera-se que, nessas zonas, são altas as probabilidades de ocorrência de estruturas cársticas tais como cavidades, condutos e, mesmo, cavernas.

---

<sup>6</sup> Apenas as SEVs 17 e 18 ficam dentro dos limites da área coberta pelas medições de resistividade do presente estudo.



**Figura 5.34: Mapa do índice de carstificação clássica.**

Sete zonas de elevados valores do IC, acima mostradas no mapa da Figura 5.34, foram hierarquizadas segundo suas dimensões e suas proximidades da zona urbana de Lapão. Essa hierarquia é mostrada na Tabela 5.3 a seguir.

A área total das 7 zonas acima indicadas soma 3,35 km<sup>2</sup>. Deve ficar bem claro, entretanto, que essa não é a área total de efetiva carstificação. A delimitação das sete áreas, com efeito, é decorrência do limite inferior adotado (75 Ω.m) e das características intrínsecas ao método de interpolação adotado. Elas devem ser encaradas, antes, como áreas onde são grandes as probabilidades de ocorrência de estruturas cársticas significativas. Não obstante, informações mais acuradas podem ser obtidas a partir da análise dos perfis de resistividade individuais.

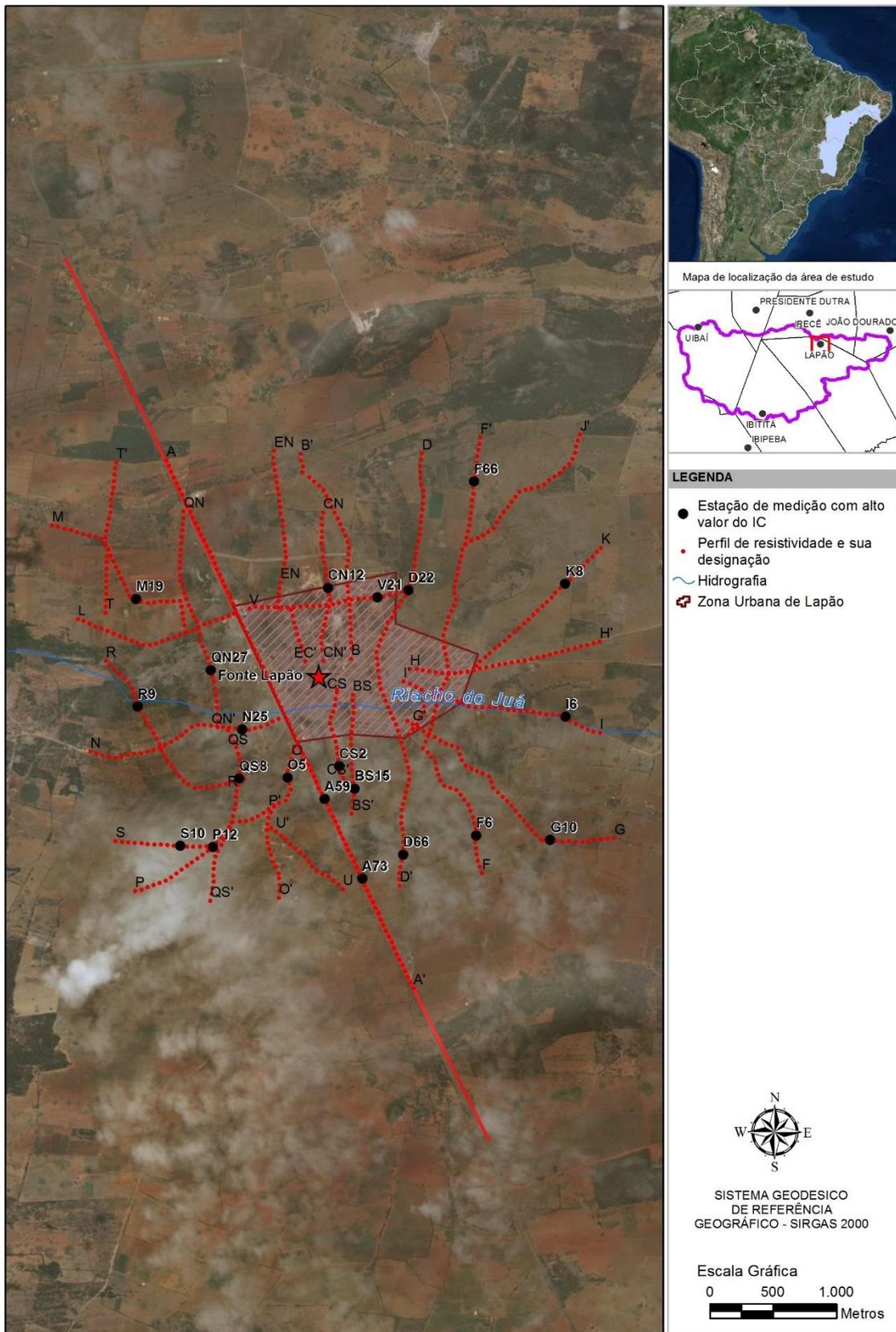
**Tabela 5.3 - Zonas de alta variabilidade elétrica em Lapão.**

Zona	Área	
	m <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>
1	1.349.069,00	1,35
2	98.000,00	0,10
3	94.194,00	0,09
4	64.795,00	0,06
5	1.146.376,00	1,15
6	313.177,00	0,31
7	282.440,00	0,28

É possível selecionar nesses perfis pontos que assinalam feições cársticas em profundidade, com maior objetividade e um grau de incerteza bem menor. Esses pontos são relacionados na Tabela 5.4 a seguir, e mostrados no mapa da Figura 5.35.

**Tabela 5.4 – Pontos de alta variabilidade elétrica em Lapão (Datum coordenadas: WGS84)**

Ponto	Perfil	UTM E	UTM N	Cota SRTM
<b>A59</b>	AA'	190.759,5	8.739.142,9	770
<b>A73</b>	AA'	191.057,8	8.738.516,0	771
<b>BS15</b>	BS BS'	190.991,5	8.739.227,7	770
<b>CN12</b>	CN CN'	190.771,5	8.740.815,1	775
<b>CS2</b>	CS CS'	190.869,7	8.739.404,6	769
<b>D22</b>	DD'	191.392,8	8.740.802,3	775
<b>D66</b>	DD'	191.374,2	8.738.708,9	770
<b>F6</b>	FF'	191.936,3	8.738.866,5	776
<b>F66</b>	FF'	191.894,0	8.741.667,8	782
<b>G10</b>	GG'	192.510,3	8.738.835,6	778
<b>I6</b>	II'	192.618,8	8.739.811,3	777
<b>K8</b>	KK'	192.607,3	8.740.865,0	781
<b>M19</b>	MM'	189.282,4	8.740.712,1	769
<b>N25</b>	NN'	190.116,9	8.739.688,5	766
<b>O5</b>	OO'	190.472,4	8.739.311,3	769
<b>P12</b>	PP'	189.897,4	8.738.754,5	761
<b>QN27</b>	QN QN'	189.868,8	8.740.154,5	768
<b>QS8</b>	QS QS'	190.094,8	8.739.298,4	764
<b>R9</b>	RR'	189.304,9	8.739.861,7	767
<b>S10</b>	SS'	189.645,7	8.738.762,0	761
<b>V21</b>	VV'	191.153,5	8.740.741,5	775



**Figura 5.35: Pontos de alto valor do índice de carstificação.**

## **Zonas de alta variabilidade elétrica**

O que distingue o presente estudo geofísico dos estudos anteriores é o seu caráter mais regional. Enquanto este estudo enfocou toda a área urbana de Lapão e as áreas rurais circunvizinhas, totalizando 18,0 km<sup>2</sup>, os estudos anteriores se concentraram em áreas localizadas da zona urbana de Lapão. Como se verá na sequência da exposição, o presente estudo confirma os resultados dos estudos precedentes e os extrapola para áreas mais amplas.

Na sequência da exposição, serão discutidas as 7 zonas de alta variabilidade elétrica indicadas na Tabela 5.3.

### **Zona 1**

A Zona 1 (Figura 5.34), bastante ampla, segue, pela margem oeste, a rodovia Irecê-Canarana. Esta rodovia serve, praticamente, de limite entre a zona urbana de Lapão, a leste, e a zona de características mais rurais, a oeste. Não obstante, a urbanização de Lapão já cruza a rodovia. Existem, com efeito, galpões de indústrias e alguns bairros residenciais em expansão, na margem oeste da rodovia. Essa é, portanto, uma zona provavelmente muito carstificada e que oferece riscos potenciais. A Zona 1 apresenta uma projeção na direção nordeste que cruza a estrada e invade decididamente a porção norte da zona urbana de Lapão, entre a Fonte do Lapão e a área do cemitério (Figura 5.34). Essa projeção se alinha com a Zona 3 e a Zona 6 para caracterizar uma direção NE-SW. Essa direção, embora não seja a mais proeminente, é citada pelos autores, a exemplo de Maia *et al* (2010), como uma das direções de faturamento dos calcários Salitre na área de Lapão. A zona de alta variabilidade elétrica aqui designada de Zona 1 exibe um nítido alinhamento NNW-SSE, corroborado pela Zona 7.

### **Zona 2**

A Zona 2, de dimensões médias, se desenvolve na porção sudeste da zona urbana de Lapão, no local correspondente à Fazenda do Gildásio e ao Loteamento Ida Cardoso. Na Fazenda do Gildásio e numa das ruas do loteamento ocorreram rachaduras, citadas nos estudos anteriores. A Zona 2, juntamente com a porção meridional da Zona 1, parece compor um alinhamento NE-SW paralelo ao anterior. Parece também compor, com as zonas 4 e 5, um alinhamento NW-SE. Essa zona estaria, assim, no cruzamento de duas zonas preferenciais de carstificação, o que teria contribuído para a instabilidade atualmente observada.

### **Zona 3**

A Zona 3 está localizada na porção nordeste da zona urbana de Lapão. Parece ratificar, com a Zona 5, a direção NW-SE acima citada.

### **Zona 4**

A Zona 4 caracteriza, juntamente com as zonas 1, 3 e 6, um nítido alinhamento E-W. Esse alinhamento E-W é muito conspícuo no extremo norte da área estudada e coincide com a direção do acamamento dos calcários, que apresentam mergulho sub-vertical.

### **Zona 5**

A Zona 5, muito ampla, situa-se na periferia sudeste da zona urbana de Lapão. Compõe, com as zonas 3 e 4, a direção NW-SE acima citada. Com a Zona 7 ratifica a direção E-W caracterizada anteriormente.

### **Zona 6**

A Zona 6 integra as direções NE-SW e E-W, acima caracterizadas.

### **Zona 7**

A Zona 7 integra o alinhamento E-W acima caracterizado.

### **Possibilidades de interpretação geológica**

Foram realizados 27 perfis de resistividade, apresentados no Anexo 1. Em cada um desses perfis mostra-se a curva de resistividades aparentes, a curva do IC clássico e a topografia. A análise das curvas e da respectiva topografia, em cada perfil, bem como o conjunto de informações disponíveis, permitem tecer as seguintes considerações:

- Nos locais de baixa variabilidade elétrica, a ocorrência de resistividades aparentes na faixa de 100 a 300 ohm.m ( $AB/2 = 100$  m), consideradas baixas no contexto, sugerem a presença de solos argilosos secos recobrimo calcários. Resistividades aparentes acima desses valores sugerem calcários aflorantes, pouco ou não carstificados, sem recobrimento de solos ou com recobrimento insignificante.
- Tentativas de correlações cota do terreno x resistividade aparente e cota do terreno x IC mostraram que esses parâmetros independem, no cômputo geral, da topografia. A análise dos perfis de resistividade revela, entretanto, que ocorrem frequentemente grandes variabilidades elétricas (altos valores do IC) em depressões topográficas localizadas. É frequente, por outro lado, a ocorrência de baixas resistividades aparentes e fraca variabilidade elétrica em cotas mais altas. Esse comportamento é muito evidente nos perfis A e D, mas ocorre também, com alguma clareza, nos perfis R, N, B, D, G e S. Os desníveis topográficos são, comumente, da ordem de 5 a 6 metros, às vezes em patamares sucessivos. No perfil A o desnível chega a 18 metros, mas não de forma localizada. De qualquer forma, as altas variabilidades elétricas ocorrem, também aqui, nas cotas mais baixas. Observam-se também, em alguns locais, trechos de baixa variabilidade elétrica passando para trechos de alta variabilidade elétrica sem quebras na topografia.
- Em função do acima exposto é lícito admitir que as depressões topográficas localizadas, exibindo altos valores de IC, possam corresponder a dolinas em lento processo de abatimento devido a discretos colapsos de estruturas cársticas.
- Admite-se que o material preenchendo as dolinas parcialmente colapsadas (areias argilosas ou argilas arenosas), proveniente do recobrimento pretérito, possa estar de permeio com blocos de rocha sã, o que condiciona um meio suficientemente heterogêneo, acredita-se, para provocar uma alta variabilidade elétrica. As altas resistividades aparentes medidas pontualmente nessas condições (vide perfis de

resistividade) não refletem necessariamente a resistividade real do meio, mas traduzem, antes, as distorções localizadas do campo elétrico, associadas à variabilidade estrutural e litológica do preenchimento da dolina, bem como efeitos de eletrodos. Neste último caso, é possível, inclusive, que um eletrodo de corrente A, por exemplo, encontre subitamente um meio muito resistivo, ocasionando um pico de resistividade deslocado de  $AB/2$  da feição que o causou. Assim, os valores da resistividade aparente, em si, não são tão significativos quanto o é a sua variabilidade.

#### **5.2.2.4 Mapa de dolinas**

Foram 864 medições de resistividade feitas na área estudada. Em cada uma dessas medições foi obtida a cota topográfica a partir de uma imagem SRTM. A partir das 864 cotas foi obtido um mapa topográfico da área estudada, com o auxílio do programa Surfer. Este mapa representa uma superfície ajustada estatisticamente aos pontos amostrais, ou seja, às cotas medidas. As diferenças entre as cotas medidas e as cotas previstas pela superfície ajustada são os resíduos, calculados também pelo Surfer. Os resíduos negativos enfatizam zonas fechadas, topograficamente rebaixadas, que podem ser interpretadas como dolinas. Essas zonas serão referidas como tal na sequência da exposição.

Foi elaborado, desta forma, o mapa de dolinas mostrado na Figura 4.34. Neste mapa, as grandes dolinas que se manifestam nos cantos noroeste e nordeste são devidas à extrapolação da krigagem além dos pontos amostrais. A maioria das dolinas tem diâmetro que não excede os 200 metros.

#### **5.2.2.5 Direções preferenciais de carstificação**

De acordo com mapa de dolinas (Figura 5.36) a formação dessas estruturas parece ocorrer preferencialmente na direção NE-SW a ENE-WSW e na direção NW-SE.

No que diz respeito ao mapa do índice de carstificação (Figura 4.34), as zonas de alto IC parecem se alinhar preferencialmente segundo as mesmas direções acima indicadas. Além dessas, uma direção E-W se manifesta com nitidez no extremo norte da área, em cotas elevadas, condicionada provavelmente por carstificações ao longo do flanco ou do eixo E-W de uma dobra assimétrica, dentre tantas que caracterizam a Bacia de Irecê.

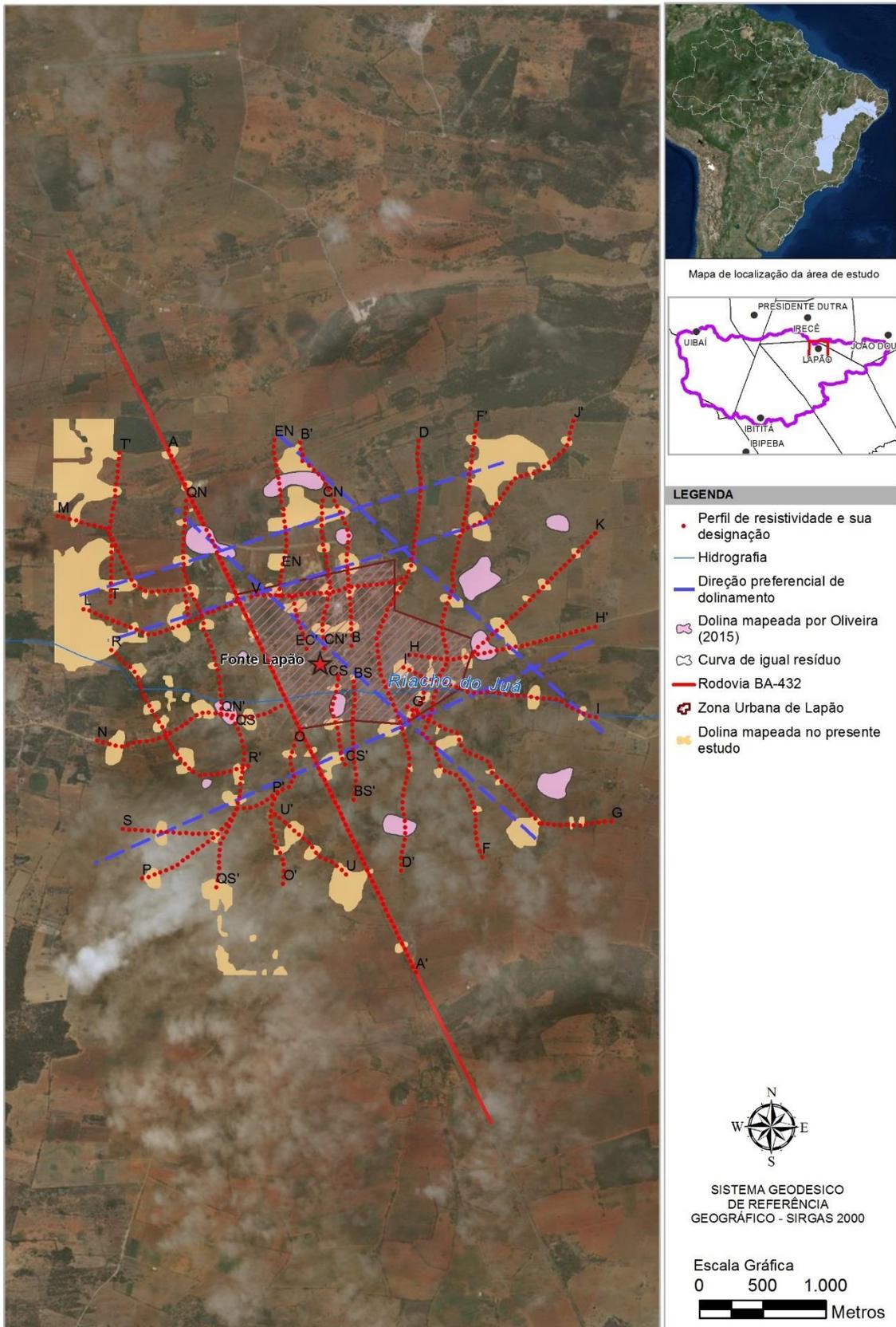
Ainda a propósito das direções preferenciais de carstificação, é oportuno examinar o mapa de vazões da área piloto do riacho do Juá, aqui reproduzido na Figura 5.37. A análise desse documento sugere fortemente a ocorrência de maiores vazões dos poços, acima de  $10,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , numa ampla faixa na diagonal NE-SW do mapa. Dentro dessa faixa, concentram-se zonas de vazões superiores a  $20,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , num alinhamento que, vindo de Ibipeba, a sudoeste, passa em Ibititá, tangencia Aguada Nova e vem dominar a região de Lapão e Gameleira, no extremo nordeste do mapa.

Esse resultado vem fortalecer a hipótese segundo a qual a direção NE-SW desempenha papel preponderante nos processos de carstificação da Formação Salitre na área em estudo.

### **5.2.2.6 Sugestão para a expansão urbana de Lapão**

A comparação entre o mapa do índice de carstificação (Figura 5.34) e o mapa de dolinas (Figura 5.36) mostra que estas são sempre de menores dimensões que as zonas de alto IC. Uma inspeção visual dos dois mapas mostra que de cerca de 66 dolinas mapeadas 51 estão situadas em áreas de alto índice de carstificação ou em suas bordas. Cerca de 77% das dolinas mapeadas, portanto, estão associadas a zonas de alta variabilidade elétrica dos calcários. Este resultado representa, de um lado, um testemunho favorável à pesquisa de estruturas cársticas pelo índice de carstificação. Ele vem encorajar, por outro lado, a proposição de áreas consideradas de baixo risco, visando à expansão urbana da cidade de Lapão. Na delimitação das áreas consideradas de baixo risco, o critério adotado foi a ausência de dolinas e de áreas de alta variabilidade elétrica. As áreas consideradas como de risco, por outro lado, são aquelas em que há predominância de alta variabilidade elétrica associada à presença de dolinas.

Os resultados obtidos são mostrados no item 10.6, no mapa da Figura 11.15 intitulado “Áreas de risco e áreas seguras em Lapão”



**Figura 5.36: Mapa de dolinas.**

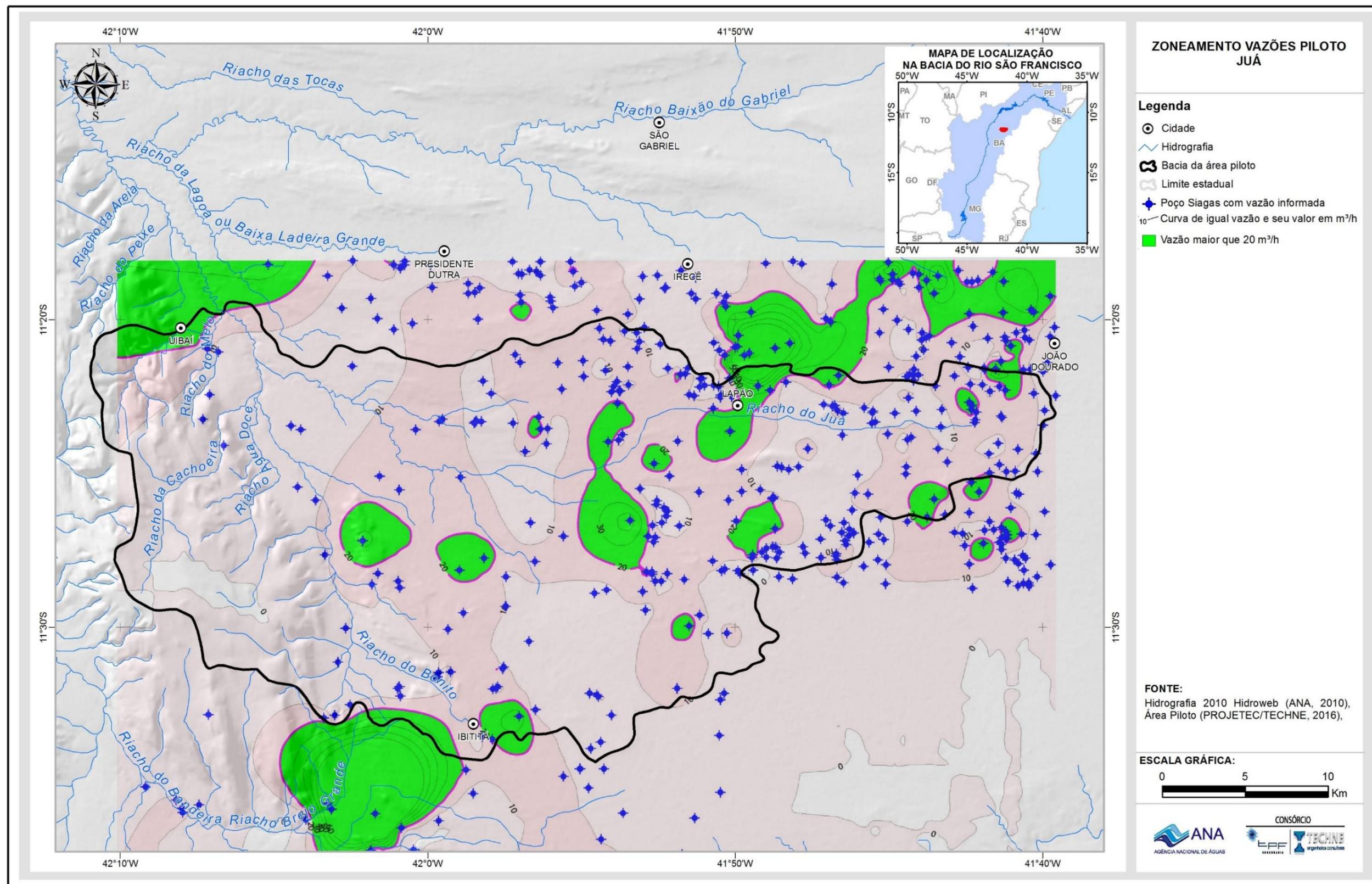


Figura 5.37: Zoneamento de vazões da área piloto do riacho do Juá.

### 5.3 Perfilagem óptica e geofísica de poços

A perfilagem óptica de poços consiste na investigação a partir da geração de imagens laterais e de fundo dos poços. 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. Já a perfilagem 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 5.5:

**Tabela 5.5 - Identificação dos métodos geofísicos aplicados.**

Perfil de Multifunção (9143) As cores dos diferentes sensores da ferramenta foram padronizadas, 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.

No presente trabalho foram corridos perfis de Multifunção, ferramenta 9143. Foram calculadas as curvas correspondentes aos desvios dos poços os quais foram, posteriormente, plotados em planta. A ferramenta de perfil sônico 9320 forneceu o registro dos raios gama, das velocidades e dos tempos de trânsito, a partir dos quais se obtém a porosidade total. As curvas de volume de folhelho (VSH) e de porosidade efetiva (POREFF) foram obtidas também pela ferramenta de perfil sônico. O conjunto dessas informações permitiu 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 Salitre, foram selecionados seis poços convenientemente espaçados. Esses poços são indicados na Tabela 5.6. Suas posições são indicadas no mapa da Figura 5.38.

**Tabela 5.6 - Poços utilizados.**

Sigla	Código do Perfil	Cidade	Perfilagem	
			Ótica	Geofísica
<b>J-082P</b>	PKT_01_BA	Ibititá/BA	Sim	Sim
<b>J-146P</b>	PKT_02_BA	Lapão/BA	Sim	Sim
<b>J-085P</b>	PKT_03_BA	Uibaí/BA	Sim	Não
<b>J-022P</b>	PKT_04_BA	Ibititá/BA	Sim	Sim
<b>J-031P</b>	PKT_05_BA	João Dourado/BA	Sim	Sim
<b>J-038P</b>	PKT_06_BA	Uibaí/BA	Sim	Sim

Poços revestidos não foram perfilados geofisicamente, como foi o caso do poço J-085P (PKT\_03\_BA), que foi apenas filmado.

Integrando as respostas às perfilagens realizadas nos diferentes poços, foi possível obter informações sobre o comportamento estrutural dos calcários da Formação Salitre.

A Unidade Nova América, reconhecida nos poços J-031P e J-082P, corresponde a um calcário cinza claro intercalado com níveis margosos, exibindo um visível acamamento. A ocorrência de veios preenchidos por calcita é restrita e ocorre em geral concordante com a direção preferencial do acamamento. A intersecção das fraturas abertas, concordantes com o acamamento, com planos de fratura, cria micro espaços até aberturas maiores, responsáveis pelas principais entradas de água.

No poço J-031P este padrão é contínuo, com altura das cavidades variando de 4 a 19 cm (Figura 5.39). A partir dos 50 metros de profundidade, o calcário apresenta uma densidade alta de fraturas preenchidas por calcita, sem ocorrência de fraturas abertas ou espaços inter-acamamento.

No município de Lapão, o poço J-046P representa a Unidade Irecê onde o calcário é caracterizado por uma coloração cinza médio, não apresentando fraturas abertas, mas sim, preenchidas por calcita, com micro espaços inter-acamamento restritos. A SW da área, no poço J-022P (Figura 5.40), os calcários apresentam coloração cinza médio a escuro, com intercalação de siltitos, apresentando um comportamento distinto onde as micro cavidades resultam da intersecção de fraturas abertas com o acamamento. No intervalo de 64,94 até 66,86 metros, o calcário é cinza escuro e há uma ocorrência densa de fraturas, micro falhas e veios preenchidos por calcita.

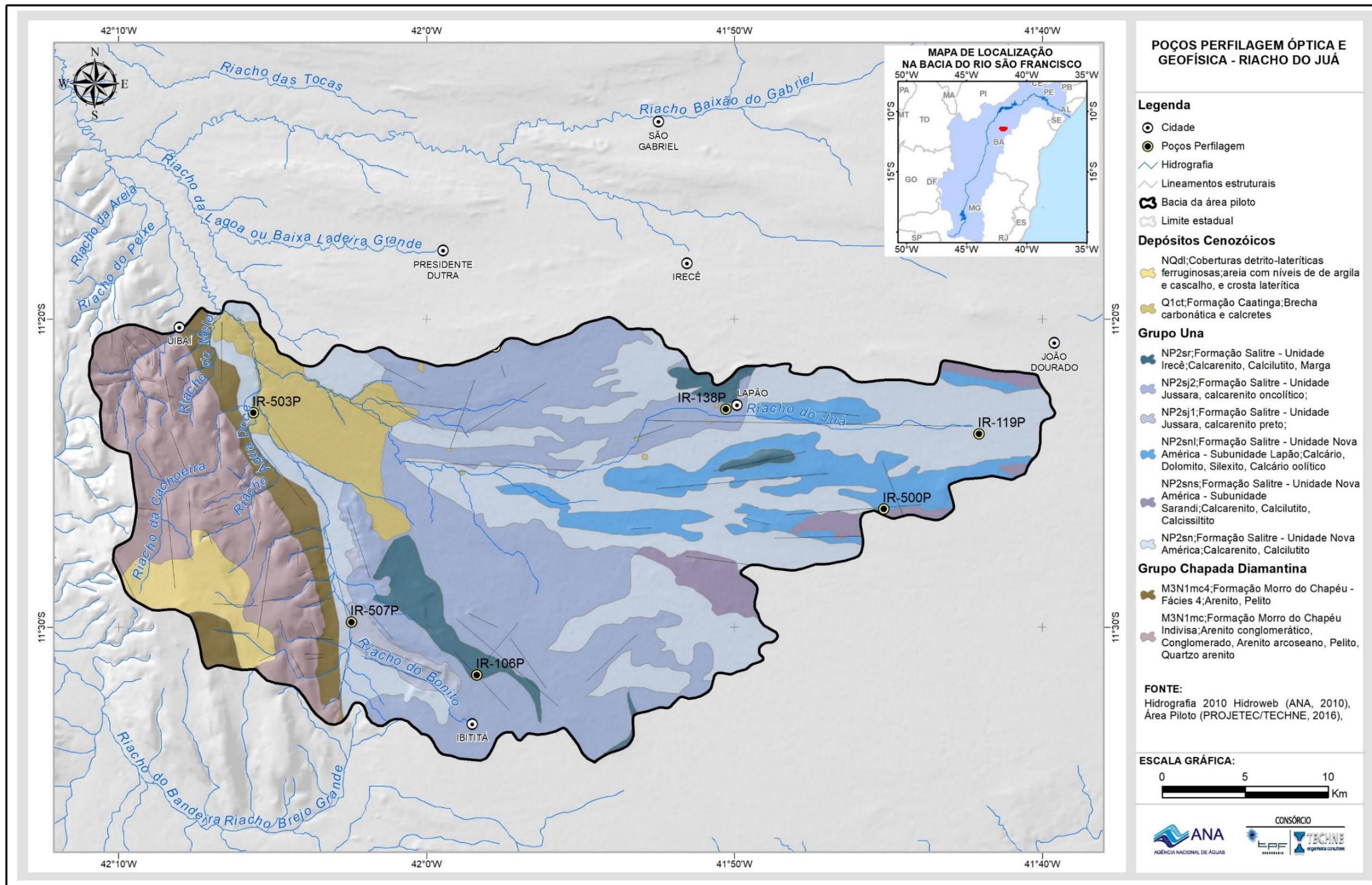


Figura 5.38: Localização dos poços utilizados para a realização de Perfisagem Óptica e Geofísica.

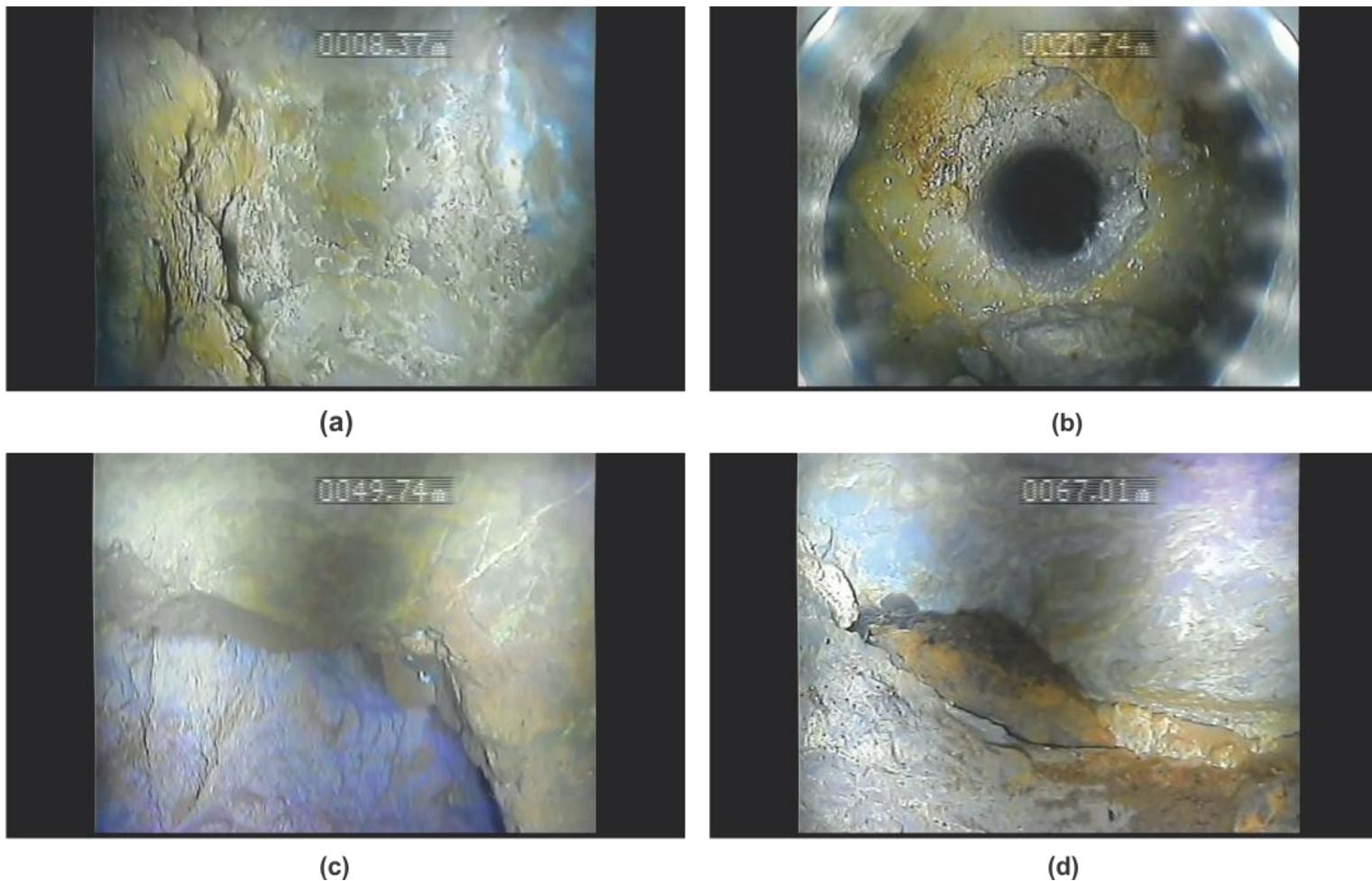
O poço J-038P, representativo da Unidade Jussara, apresenta intercalação de calcário com metapelitos representados por argilito e siltito, até cerca de 61 metros de profundidade (Figura 5.41). O calcário apresenta coloração cinza claro, com predominância de micro fraturas sem padrão preferencial de direção, que interceptam perpendicularmente planos de acamamento e geram cavidades que são responsáveis pelas principais entradas d'água. Essas cavidades não são profundas e apresentam uma largura de 5 cm por 15 cm de altura. A partir dos 65 metros, a ocorrência de fraturas preenchidas por calcita é densa e os veios acompanham a direção do acamamento (Figura 5.41).

Em linhas gerais, os resultados obtidos pelas perfilagens óticas e geofísicas indicam que a composição litológica da Formação Salitre é essencialmente calcária e, conseqüentemente, predominantemente resistiva, do ponto de vista elétrico. Localmente e restritamente ocorrem intercalações de metapelitos eletricamente condutivos.

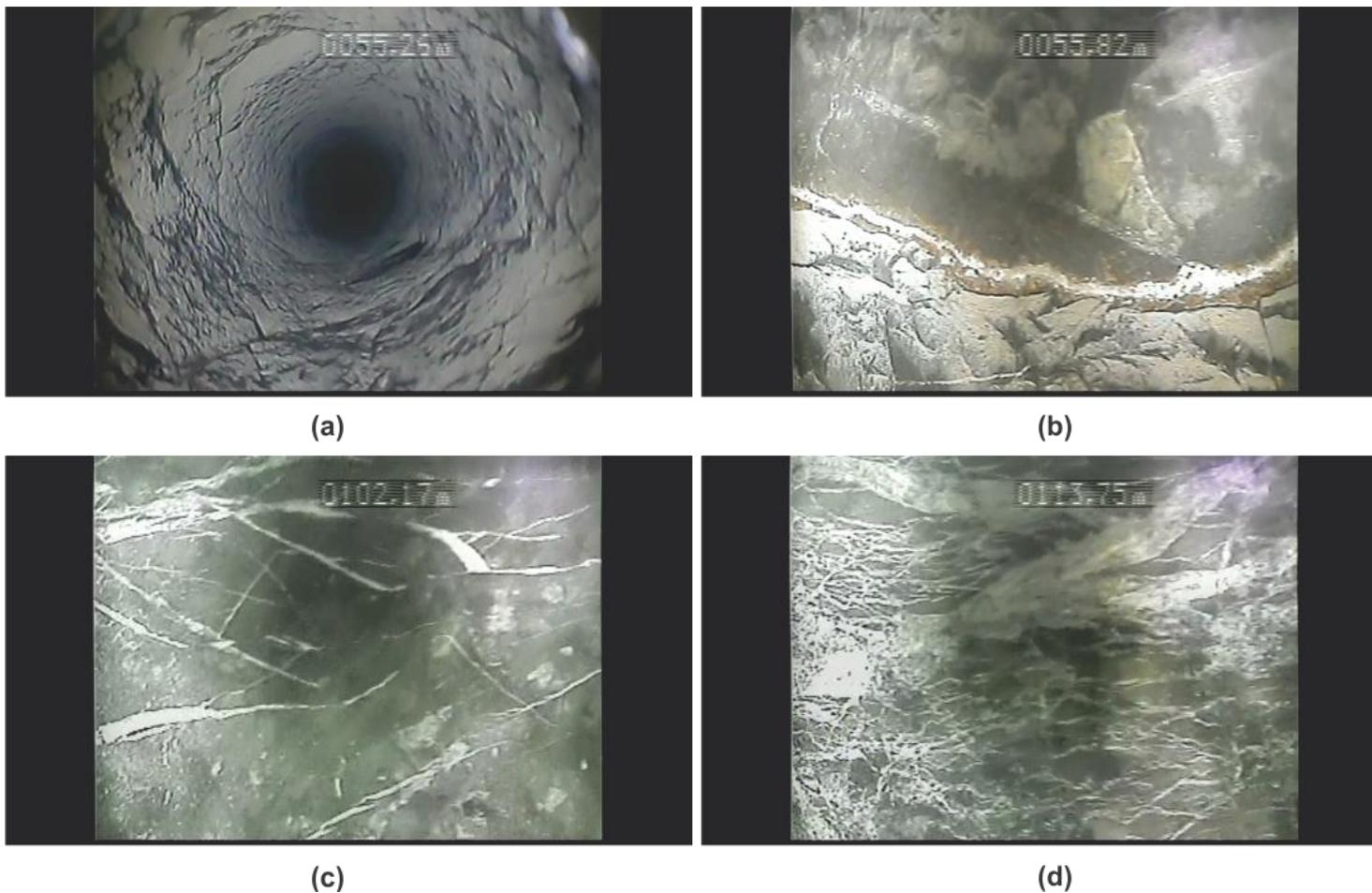
A radiação gama, que deveria ser baixa nos calcários, apresenta valores aleatórios, sem um padrão definido. Esse comportamento pode ser explicado por finas intercalações de material argiloso e síltico.

A ferramenta Caliper utilizada é do tipo três braços, o que favoreceu a detecção de fraturas abertas e estruturas de dissolução em praticamente todos os poços, particularmente no intervalo entre 10 e 40 metros, onde é alta a densidade dessas feições.

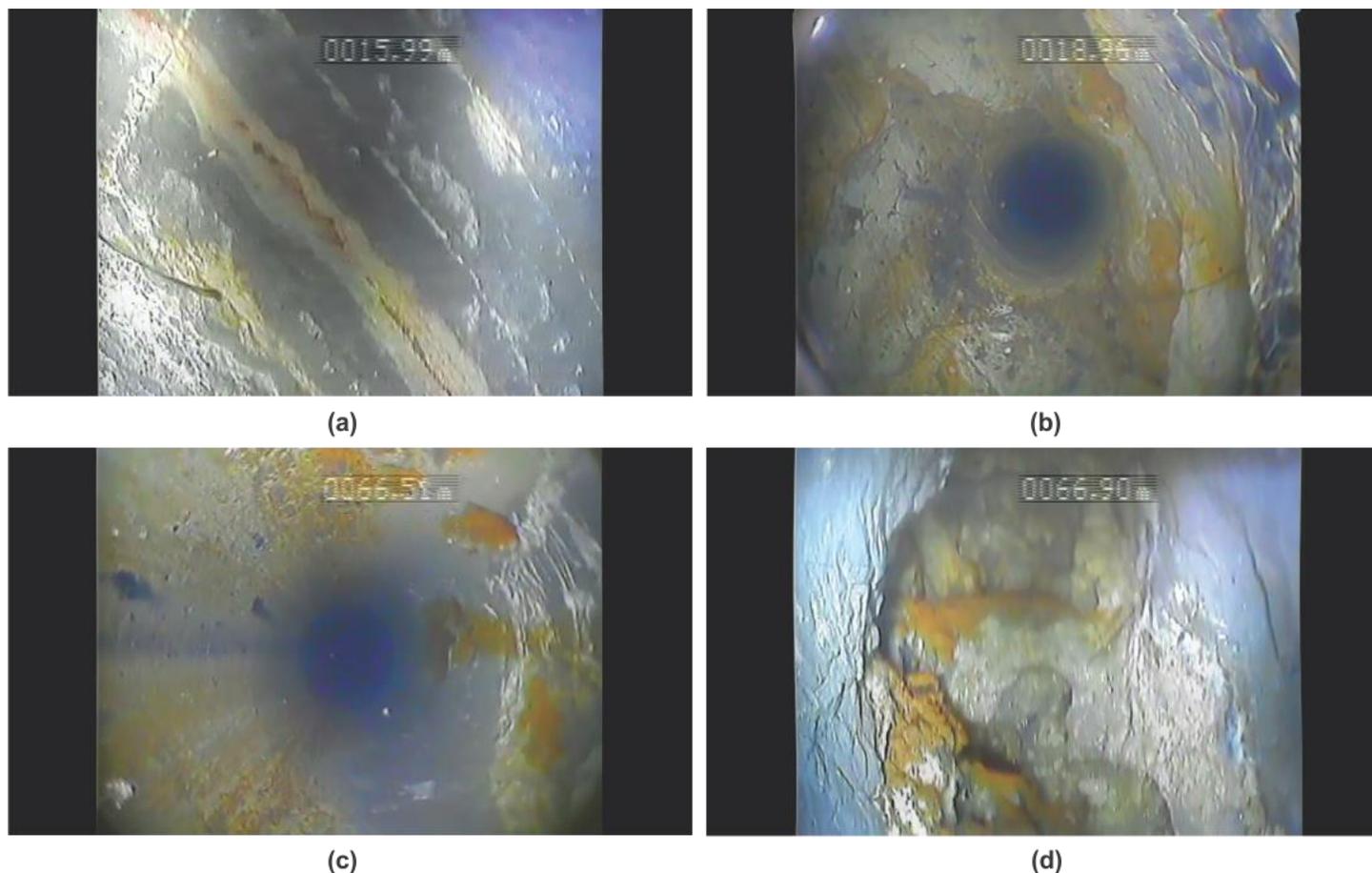
No cômputo geral, as informações hidrogeológicas mais úteis, nos cinco poços perfilados, foram fornecidas pelo cruzamento dos perfis Sônico e Caliper, que permitiu discernir os trechos de elevada porosidade associados a possíveis cavidades na parede da perfuração. Essas informações, em muitos casos, são ratificadas pelas imagens das perfilagens óticas.



**Figura 5.39: Perfilagem óptica no Poço J-031P. (a) Comportamento do bandamento verticalizado na Unidade Nova América; (b) Vista geral do Poço J-031P; (c) Vista lateral da fratura aberta destaque para fraturas preenchidas perpendiculares a direção preferencial do acamamento; (d) Micro espaços entre o bandamento.**



**Figura 5.40: Perfilagem óptica no Poço J-022P. (a) Vista geral do poço; (b) Micro espaços entre planos de acamamento cortados por fraturas abertas e preenchidas de pouca profundidade; (c) Fácies representando um calcário cinza escuro com ocorrência densa de fraturas e falhas preenchidas por calcita, presentes na Unidade Irecê, que se estende em todo o poço; (d) Veios preenchidos por calcita, ricos neste intervalo (113,75 metros).**



**Figura 5.41: Perfilagem óptica no Poço J-038P. (a) Comportamento estrutural típico no calcário observado nos primeiros 15 metros durante a perfilagem; (b) Vista geral do poço numa das entradas de água; (c) Comportamento do calcário a partir do intervalo de 60 metros; (d) Fratura aberta com baixa profundidade obedecendo a direção preferencial do comportamento verticalizado do acamamento.**

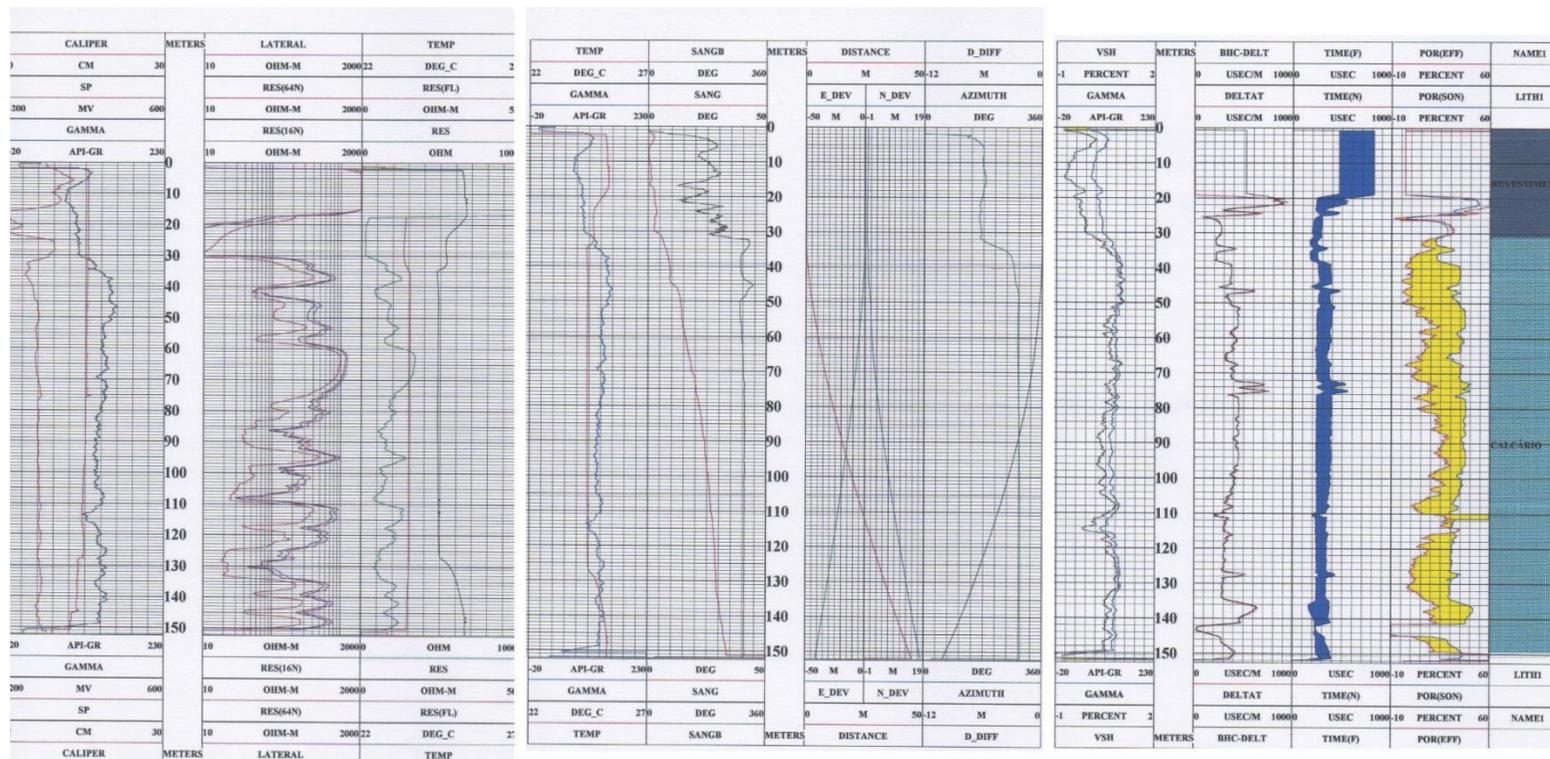


Figura 5.42: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-031P.

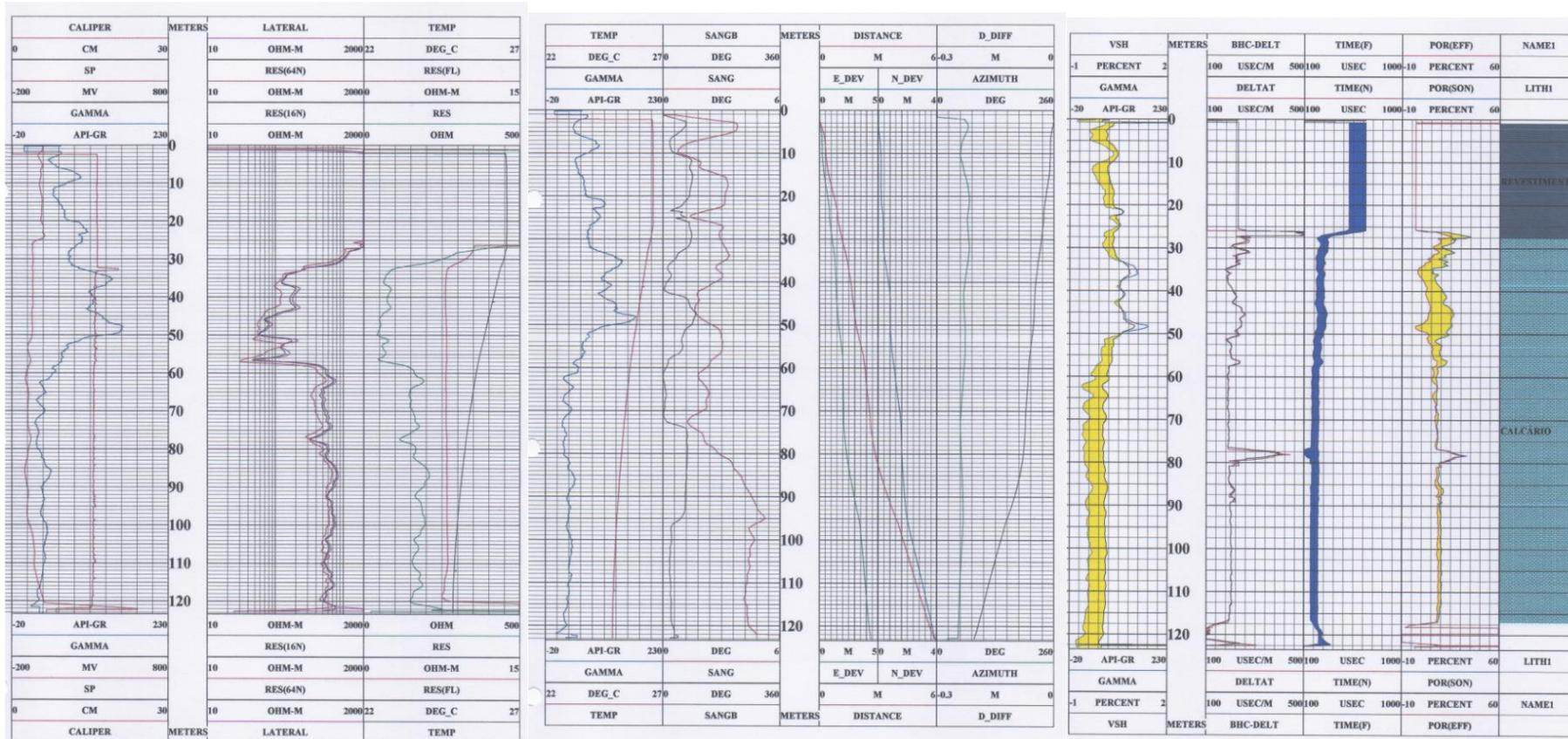


Figura 5.43: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-046P.

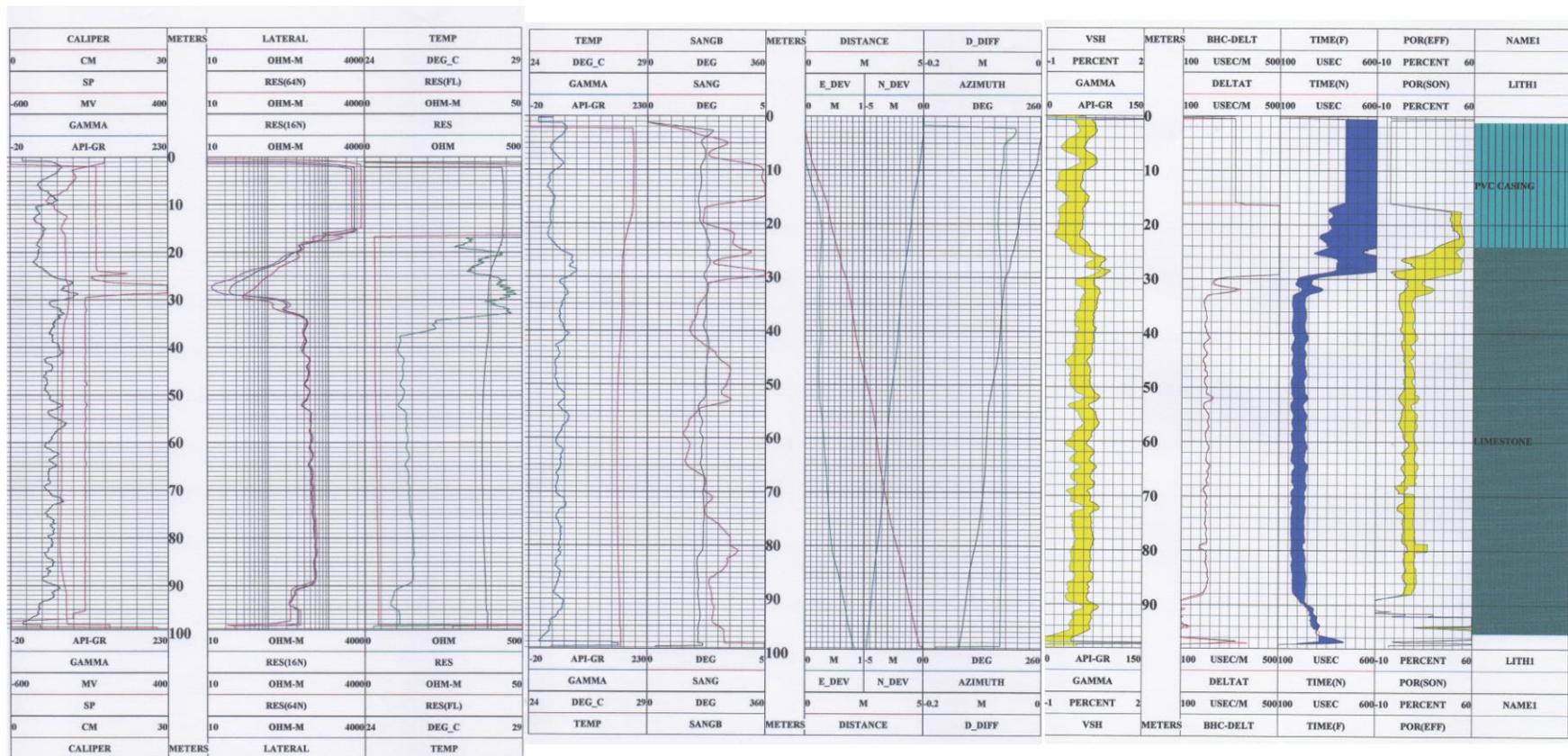


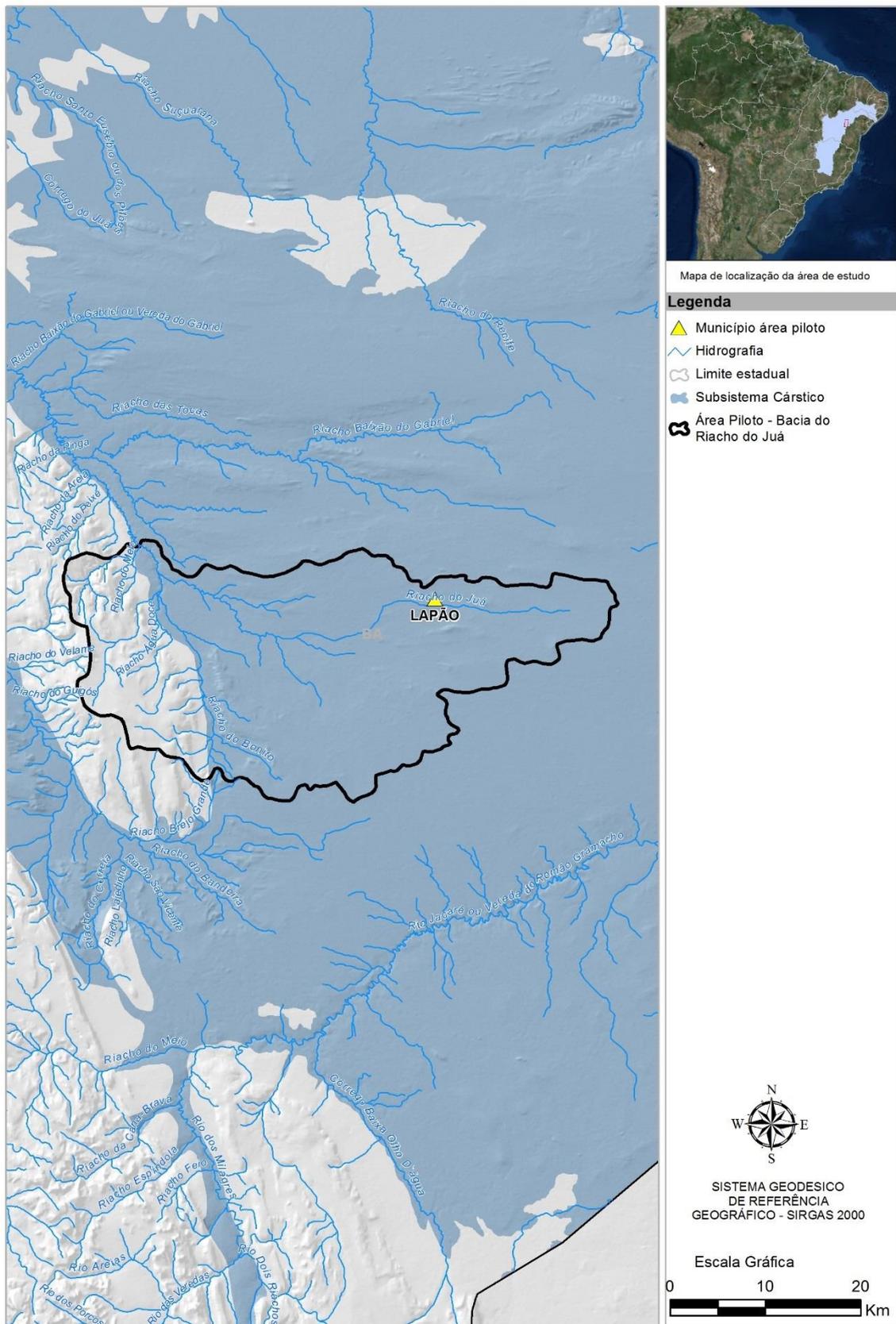
Figura 5.44: Perfis correspondentes aos métodos geofísicos aplicados no poço J-038P.

## 6. Hidrogeologia

No contexto geral do Carste São Francisco, a área piloto do riacho do Juá, diferentemente das duas outras áreas piloto, se desenvolve sobre rochas carbonatadas da Formação Salitre do Grupo Una. Esta formação se apresenta em altas cotas topográficas constituindo o que se chama na literatura de Platô de Irecê, limitado, a leste e a oeste, por cristas da Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina.

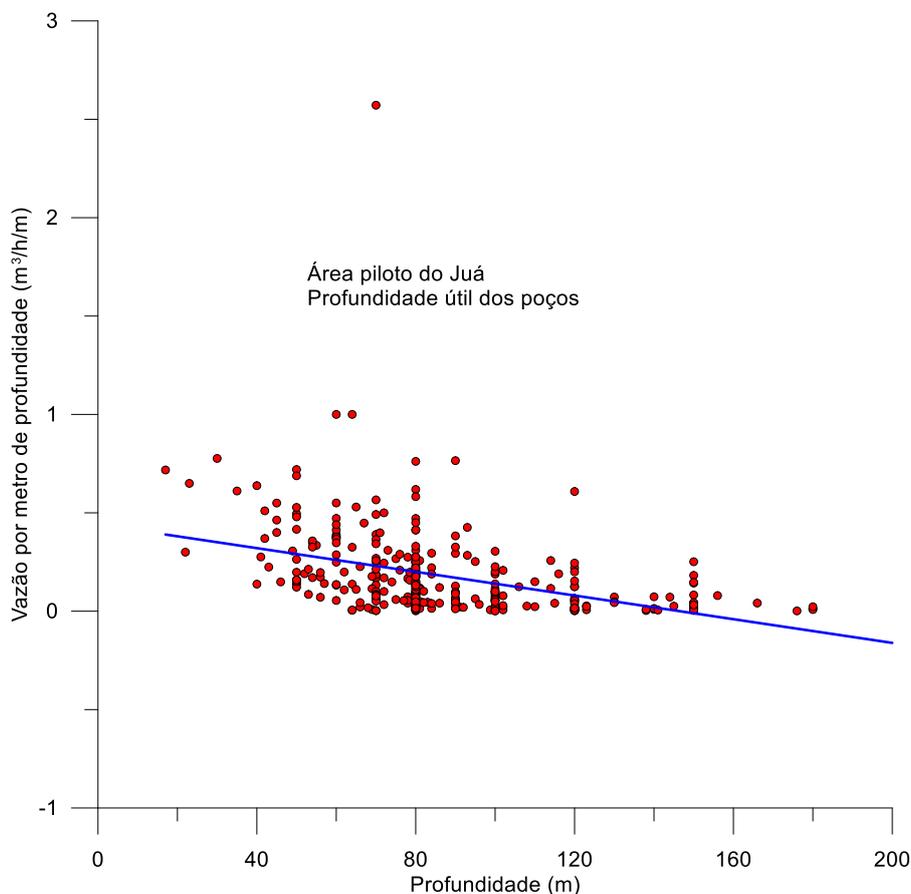
Ao longo dos trabalhos de campo na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, entre novembro/2013 e maio/2015, foram cadastrados 80 novos poços com medição do nível estático e foram registrados 497 poços SIAGAS, dos quais 409 poços têm perfil litológico e construtivo. Essas informações, integradas com diversas outras geradas ao longo do desenvolvimento do projeto, foram exploradas em busca de uma melhor compreensão do comportamento hidrogeológico da área. Essa exploração conduziu aos resultados adiante mostrados.

Excluída a Formação Morro do Chapéu, acima citada, ocorre na área piloto apenas a Formação Salitre, exibindo as fácies que lhe são características.



**Figura 6.1: Área piloto da Bacia do Riacho do Juá**

Uma análise das vazões, envolvendo 332 poços Siagas com vazão informada, captando a Formação Salitre do Grupo Una, na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, resultou no gráfico apresentado a seguir na Figura 6.2.



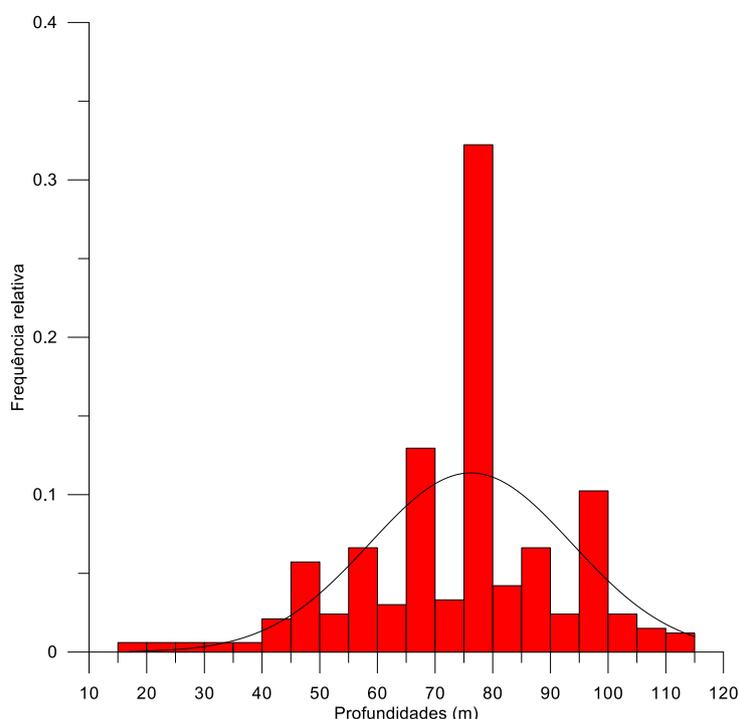
**Figura 6.2: Vazão/metro de profundidade x profundidade dos poços captando a Formação Salitre do Grupo Una.**

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 50 e 150 metros de profundidade. Pressente-se, mesmo assim, uma discreta tendência de queda com a profundidade;
- As profundidades mais frequentes situam-se entre os 50 e os 120 metros. O histograma das profundidades de 430 poços Siagas (Figura 6.3) mostra uma distribuição de frequências que pode ser aproximada por uma distribuição normal com média de 76,2 m e desvio padrão de 17,5 m;
- Um número relativamente pequeno de poços desce abaixo dos 100 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 metros, compatíveis com o caráter extremamente heterogêneo do meio cárstico.

Da mesma forma que nos calcários da Formação São Desidério (São Desidério/BA) e nos calcários da Formação Lagoa do Jacaré (Montes Claros/MG), as características comentadas apontam para um comportamento cárstico restrito a uma fatia de terreno compreendida entre a superfície e a profundidade de 120 metros, a menos de eventuais anomalias locais. O que se chama de Aquífero Salitre é o reservatório subterrâneo cárstico desenvolvido nos primeiros 120 da Formação Salitre. Recomenda-se, assim, considerar, nos sedimentos carbonatados dessa formação, na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, uma espessura útil máxima de 120 metros para fins de avaliação da reserva.



**Figura 6.3: Histograma de profundidades dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Na área piloto em estudo, as carstificações mais intensas ocorrem de forma localizada. O zoneamento de vazões mostrado a seguir dá testemunho desse comportamento. Para a obtenção desse zoneamento foram utilizados 332 poços do Siagas com vazão informada. Esse zoneamento é mostrado na Figura 6.4. A análise desse documento sugere que as maiores vazões, acima de 20,0 m<sup>3</sup>/h se distribuem segundo a direção NE-SW. Duas zonas muito produtivas, Ibipêba e Lapão, estão situadas, respectivamente, nas extremidades SW e NE desse alinhamento NE-SW. Esse comportamento permite levantar a hipótese, para posterior averiguação, de que esse alinhamento possa representar uma direção preferencial de fraturamento, ao longo da qual os processos de dissolução cárstica teriam sido favorecidos. Os trabalhos de geologia estrutural, a propósito, apontaram a direção NE-SW como uma das direções proeminentes de fraturamento.

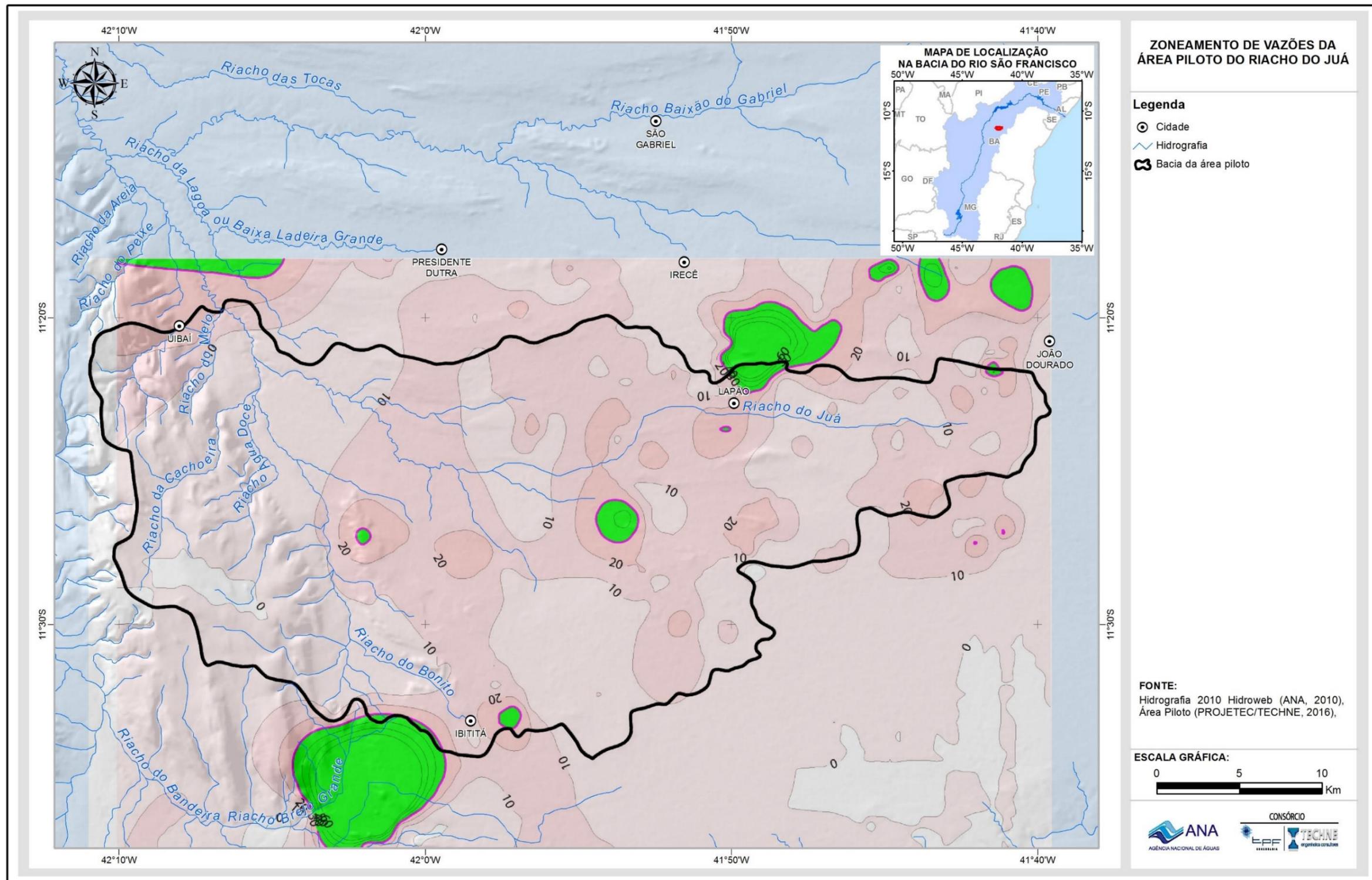


Figura 6.4: Zoneamento de vazões da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

## 6.1 Parâmetros hidrodinâmicos da Bacia do Riacho do Juá

A identificação dos parâmetros hidrodinâmicos na área piloto do Riacho do Juá partiram da realização de cinco testes de aquífero, para os quais foram selecionados os seguintes conjuntos de Poços:

- Fazenda Gameleira - Poço bombeado PB e poços observados: PO-1, PO-2, PO-3, PP<sub>b</sub>-1, PP<sub>b</sub>-2 e PP<sub>b</sub>-1-P).
- Fazenda Israel - Poço bombeado PB (Gildázio) e poços observados: PO Leda (a 1028 m), PO Gildázio (a 929 m) e PO Marcondes (a 863 m).
- Fazenda Jatobá - Poço bombeado PB e poços observados: PO-1 a 43 m, PO-2 a 48 m e PO-3 a 99 m.
- Fazenda Morro Pelado - Poço bombeado PB Hugo e um poço observado: PO Hugo a 195 m de distância.
- Fazenda Serrolândia - Poço bombeado PB e poços observados: PO João a 122 m; PO Wecsley a 740 m e PO Lourival a 804 m de distância.

A Figura 6.5 apresenta a localização desses conjuntos de poços.

As variações do nível de água foram monitoradas por sensores transdutores de pressão tipo *Levelogger 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.

Os testes foram interpretados pelo 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.

Os testes e seus resultados são discutidos a seguir.

### 6.1.1 Teste Fazenda Gameleira – João Dourado/BA

Realizado entre os dias 06.01.2015 e 10.01.2015. O dispositivo de poços existentes na área da Fazenda Gameleira onde foi realizado o teste do condutor hidráulico cárstico-fissural além do poço bombeado (Marcos Moreira), inclui 6 (seis) outras unidades, como mostra a Tabela 6.1. Trata-se, portanto, de um condutor hidráulico de direção SW-NE testado em regime dinâmico (ou seja, de superposição de escoamento), já que a seca reinante na região não permitiu a paralização dos poços para recuperação.

**Tabela 6.1 – Matriz distâncias entre poços bombeados e observados no teste do poço PB Marcos Moreira na Fazenda Gameleira.**

Ponto	UTM_E	UTM_N	PB	PO-1	PO-2	PO-3	PP <sub>b</sub> -1	PP <sub>b</sub> -2	PP <sub>b</sub> -P
<b>PB</b>	204200	8737794	0	225	423	986	1217	693	111
<b>PO-1</b>	204274	8737581	225	0	1154	606	1369	842	241
<b>PO-2</b>	204645	8738674	423	1154	0	564	250	323	1076
<b>PO-3</b>	204376	8738178	986	606	564	0	799	291	512
<b>PP<sub>b</sub>-1</b>	204843	8738826	1217	1369	250	799	0	528	1311
<b>PP<sub>b</sub>-2</b>	204607	8738354	693	842	323	291	528	0	792
<b>PP<sub>b</sub>-P</b>	204099	8737747	111	241	1076	512	1311	792	0

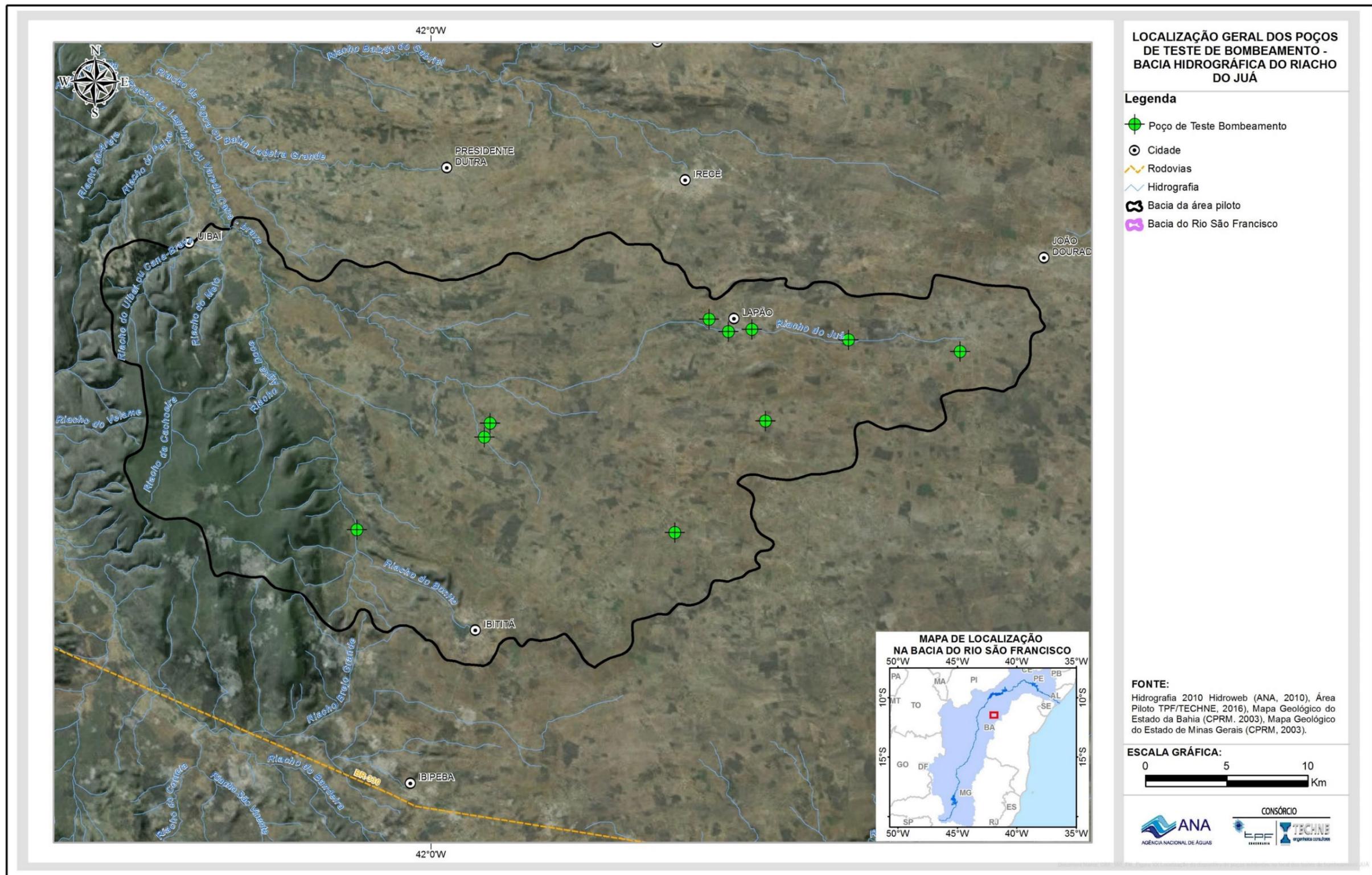
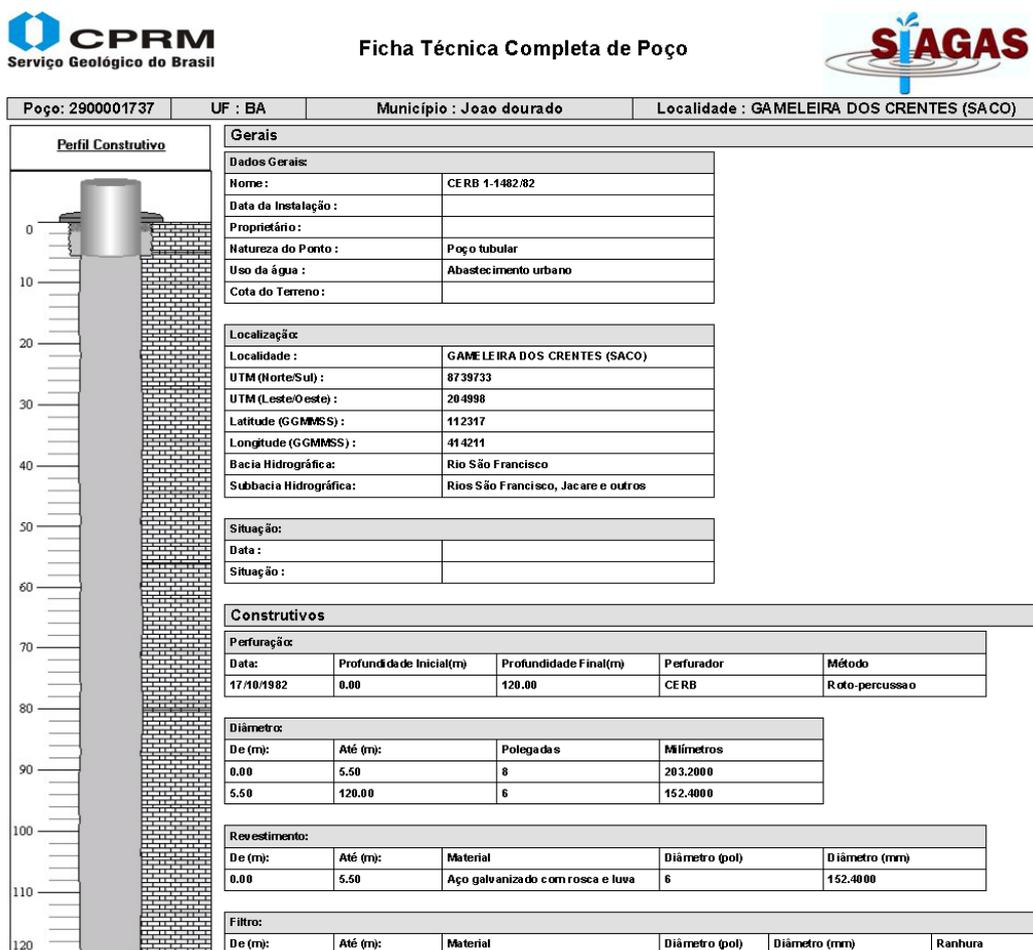


Figura 6.5: Localização da área do teste de bombeamento na Fazenda Gameleira - município de João Dourado – BA.

O perfil litológico e construtivo do poço bombeado em Gameleira dos Crentes – BA corresponde ao perfil apresentado na Ficha Técnica Completa do Poço 2900001737 do Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, conforme é ilustrado na Figura 6.6. Corresponde ainda ao poço CERB 1-1482/82. Quanto à litologia a ficha técnica do poço indica a ocorrência de calcários do Grupo Bambuí desde a superfície do terreno até a profundidade final de 120 m constituindo um aquífero cárstico fissurado que também pode ser entendido como um condutor hidráulico com entradas de água nas profundidades de 15, 95 e 97 m.



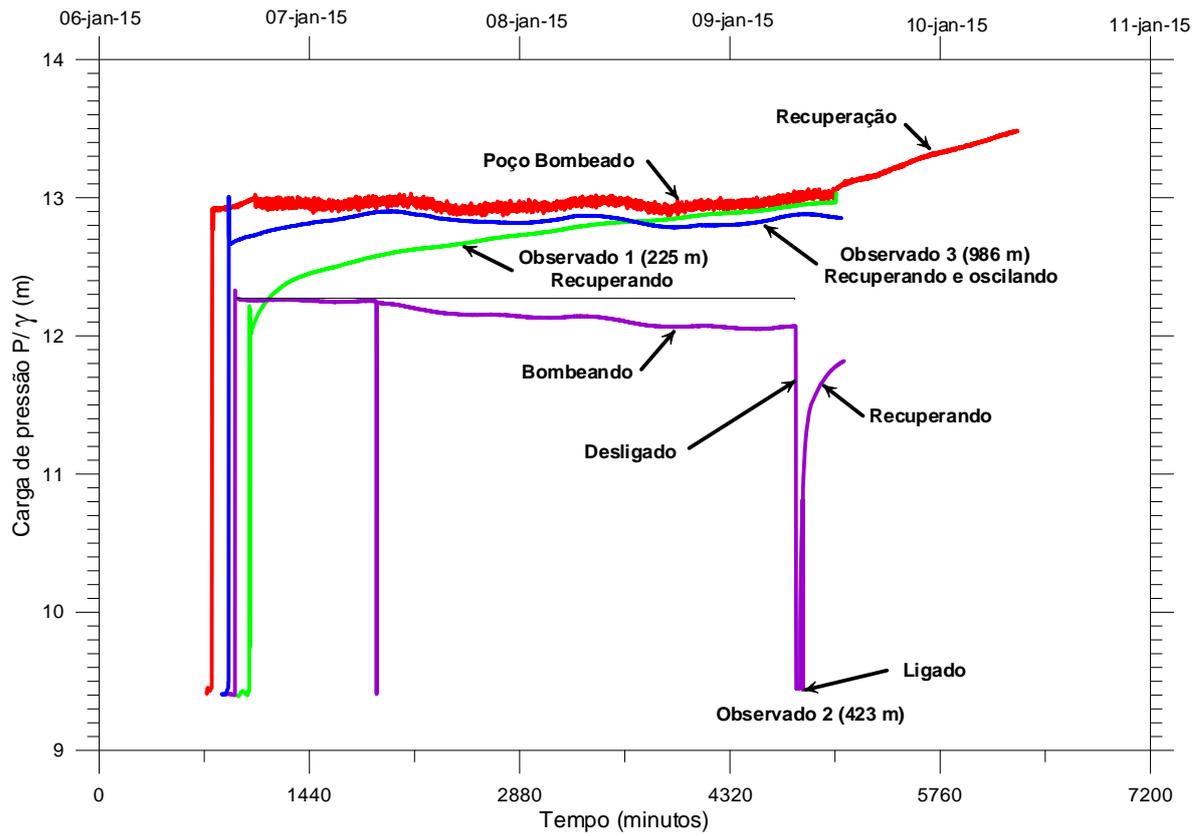
**Figura 6.6: Perfil litológico e construtivo do poço bombeado no teste da Fazenda Gameleira município de João Dourado BA. Condutor hidráulico cárstico fissural com entradas de água a 15, 95 e 97 m de profundidade.**

A realização do teste na Fazenda Gameleira foi feita em condições muito difíceis de interpretar por se tratar de um condutor hidráulico provavelmente conectado com uma caverna. Além do poço bombeado e dos 3 (três) poços observados (PO-1 Cleber a 225 m; PO-2 Valdenir a 423 m, PO-3 Ananias a 986 m), existiam 3 (três) outros em bombeamento: PPb Prefeito a 111 m, bombeando 25 m<sup>3</sup>/h em regime de 18/24; PPb-1 Joelson Miranda a 693 m, bombeando 10 m<sup>3</sup>/h em regime 12/24 e PPb-2 Edgar Moreira a 1217 m, bombeando 12 m<sup>3</sup>/h em regime de 12/24. A seca na região não permitiu que nenhum desses poços fosse paralisado para a execução do teste. Nesse caso,

a estimativa dos parâmetros hidráulicos é muito imprecisa. Não obstante, os níveis dos 3 (três) poços observados, além do testado, foram monitorados e as interferências totais inclusive dos 3 (três) outros poços em bombeamento simultâneo com o poço testado, puderam ser identificadas, permitindo dessa forma a utilização do princípio da superposição dos escoamentos.

#### **Variação das cargas de pressão nos poços da Faz. Gameleira**

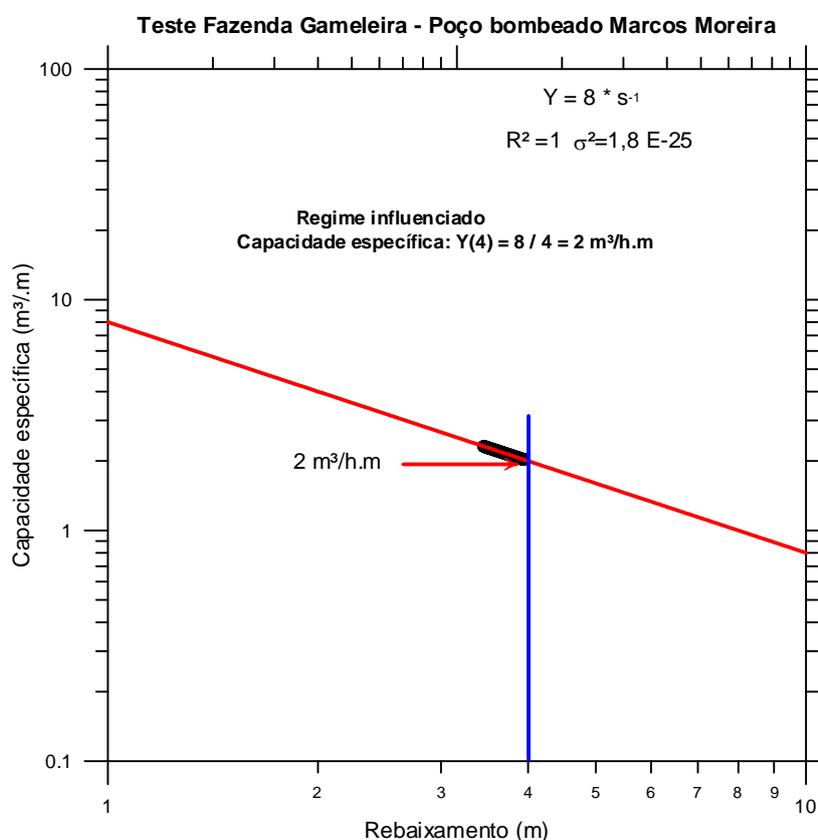
O monitoramento das cargas de pressão no poço bombeado e nos 3 (três) poços observados na Fazenda Gameleira foi realizado através de sensores transdutores de pressão no período de 06 a 11 de janeiro de 2015. As variações das cargas de pressão registradas automaticamente são ilustradas na Figura 6.7.



**Figura 6.7: Cargas de pressão registradas no poço bombeado e em 3 (três) poços de observação, durante o teste de bombeamento e de recuperação realizado na Fazenda Gameleira.**

## Capacidade específica

O teste do poço Marcos Moreira de Gameleira dos Crentes – BA foi realizado com vazão constante de 8 m<sup>3</sup>/h razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com D = 1 (Figura 6.8). Como os poços em operação nessa área já funcionam desde muito tempo, tem-se uma condição de quase equilíbrio com a capacidade específica decrescente de 8 m<sup>3</sup>/h.m (com rebaixamento de 1 m) para 2 m<sup>3</sup>/h.m (com 4 m de rebaixamento). O rebaixamento após 72 horas foi de 4 m, mas já no primeiro minuto atingiu 3,5 m sugerindo que o condutor hidráulico não sofreu influência de água de retorno do reservatório mostrado na Figura 6.9, a 38 m de distância, no qual foi lançada a água bombeada. O gráfico de rebaixamento da Figura 6.10 mostra que antes do início do teste houve significativas variações de nível no poço testado produzidas por interferências dos 3 (três) outros poços existentes em regime de bombeamento intermitente.



**Figura 6.8: Capacidade específica do poço bombeado, indicativa de regime de quase equilíbrio, como sugere a pouca variação do rebaixamento (de 3,5 a 4,0 m) durante as 72 horas de teste da Fazenda Gameleira município de João Dourado – BA.**



**Figura 6.9: Reservatório para onde foi canalizada a água bombeada do poço PB Marcos, situado a 38 m de distância. A seta aponta o local de descarga da d'água. Embora seja uma potencial fonte de retorno da água para o condutor hidráulico, não há evidência de que isto tenha ocorrido de forma significativa.**

### **Parâmetros Hidrodinâmicos**

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do condutor hidráulico são estimados no poço testado e nos poços observados. Nessa estimativa, admite-se como retirada de água do condutor hidráulico a soma da vazão do teste (8 m<sup>3</sup>/h) e das vazões contínuas equivalentes dos poços PP Prefeito (18,75 m<sup>3</sup>/h); PP-1 Joelson Miranda (5 m<sup>3</sup>/h) e PP-2 Edgar Moreira (6 m<sup>3</sup>/h), totalizando 37,75 m<sup>3</sup>/h, ou 10,5 L/s. O monitoramento dos níveis com sensores nos poços observados antes do início e durante o bombeamento mostra que é muito difícil identificar os efeitos dos bombeamentos nos diversos poços, pois existem outros poços bombeando que não foram observados e assim a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos nos poços de observação é aproximada e deve ser encarada com cautela.

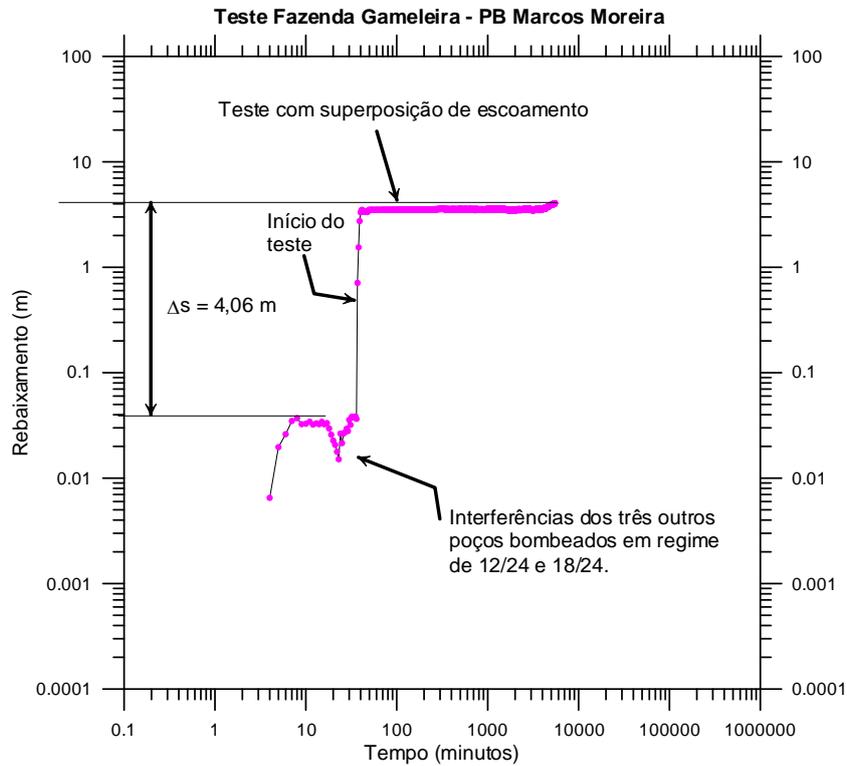
#### **6.1.1.1 Poço bombeado Marcos Moreira – Fazenda Gameleira**

As interferências dos outros 3 (três) poços bombeados no poço testado são ilustradas na Figura 6.10 e permitem verificar que a interpretação utiliza neste caso, o princípio de superposição dos escoamentos.

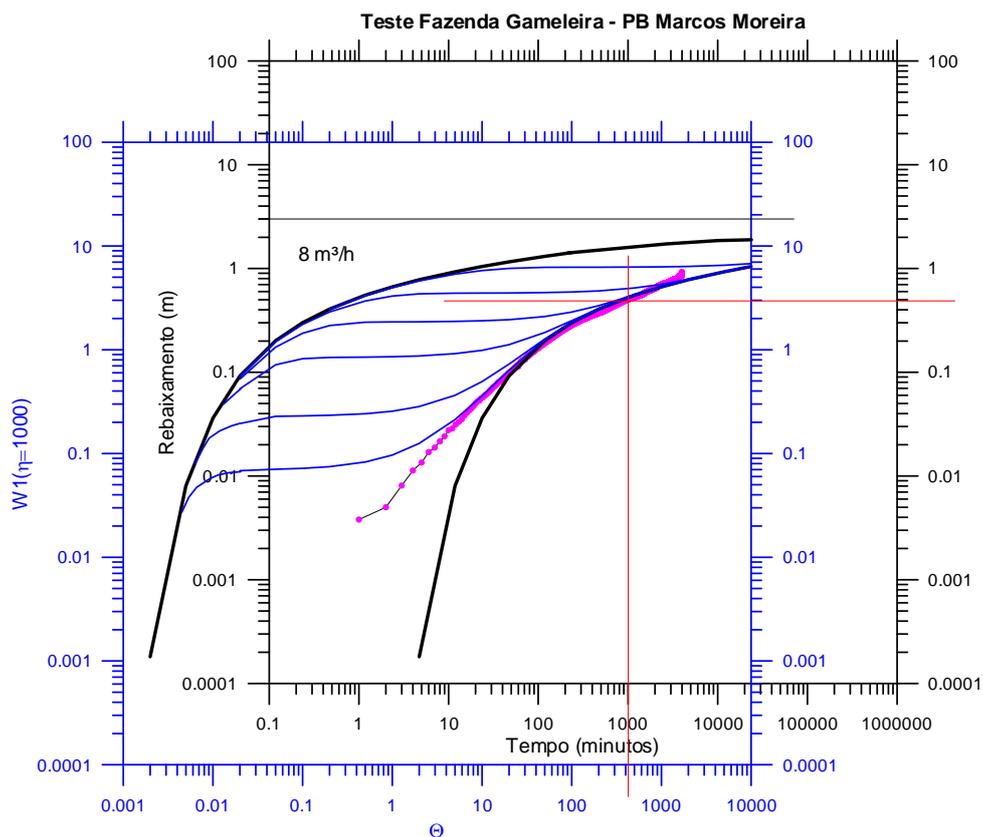
A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado Marcos Moreira com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.11), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado para vazão constante ( $D=1$ ) de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  na Fazenda Gameleira, João Dourado - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
<b>PB - Marcos Moreira</b>	1,05E-02	60000	0,5	410	3	1000	3	1



**Figura 6.10: Interferências registradas antes do teste e rebaixamento quase estacionário durante o teste do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.**



**Figura 6.11: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado Marcos Moreira na Fazenda Gameleira, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

**Tabela 6.3 – Parâmetros hidrodinâmicos no teste do poço bombeado Marcos Moreira na Fazenda Gameleira, município de João Dourado – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
5,01E-03	2,93E-02	1,842	2,72E-06

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

### 6.1.1.2 Poço PO-1 – Cleber Fazenda Gameleira a 225 m

Os parâmetros da função do poço (Bouton, 1963) são indicados na Tabela 6.4 e os parâmetros hidrodinâmicos de transporte, armazenamento e abertura média das fraturas na Tabela 6.5. O gráfico das interferências está na Figura 6.12 e a coincidência das curvas de campo e da função de Boulton na Figura 6.13.

**Tabela 6.4 – Parâmetros da função de Boulton: poço observado PO-1.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
PO-1 Cleber	1,05E-02	6000	0,024	40	1	1000	3	1

**Tabela 6.5 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-1.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
3,48E-02	4,13E-04	3,512	9,91E-06

### 6.1.1.3 Poço PO-2 – Valdenir Fazenda Gameleira a 423 m

Os parâmetros da função do poço (Bouton, 1963) são indicados na Tabela 6.6 e os parâmetros hidrodinâmicos de transporte, armazenamento e abertura média das fraturas na Tabela 6.7. O gráfico das interferências está na Figura 6.14 e a coincidência das curvas de campo e da função de Boulton na Figura 6.15.

**Tabela 6.6 – Parâmetros da função de Boulton no poço observado PO-2.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
PO-2 Valdenir	1,05E-02	6600	0,035	10	0,35	1000	3	1

**Tabela 6.7 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-2.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
8,36E-03	1,23E-04	2,184	3,83E-06

### 6.1.1.4 Poço PO-3 – Ananias Fazenda Gameleira a 986 m

Os parâmetros da função do poço (Boulton, 1963) são indicados na Tabela 6.8 e os parâmetros hidrodinâmicos de transporte, armazenamento e abertura média das fraturas na Tabela 6.9. O gráfico das interferências está na Figura 6.16 e a coincidência das curvas de campo e da função de Boulton na Figura 6.17.

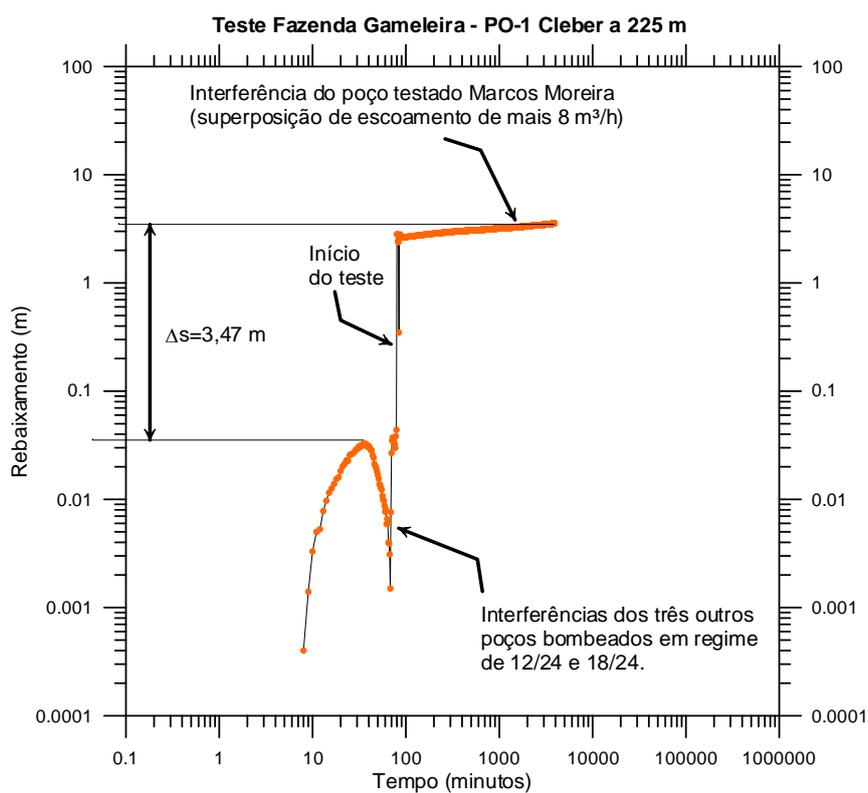
**Tabela 6.8 – Parâmetros da função de Boulton no poço observado PO-3.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
PO-3 Ananias	1,05E-02	1080	0,04	0,3	0,078	1000	3	1

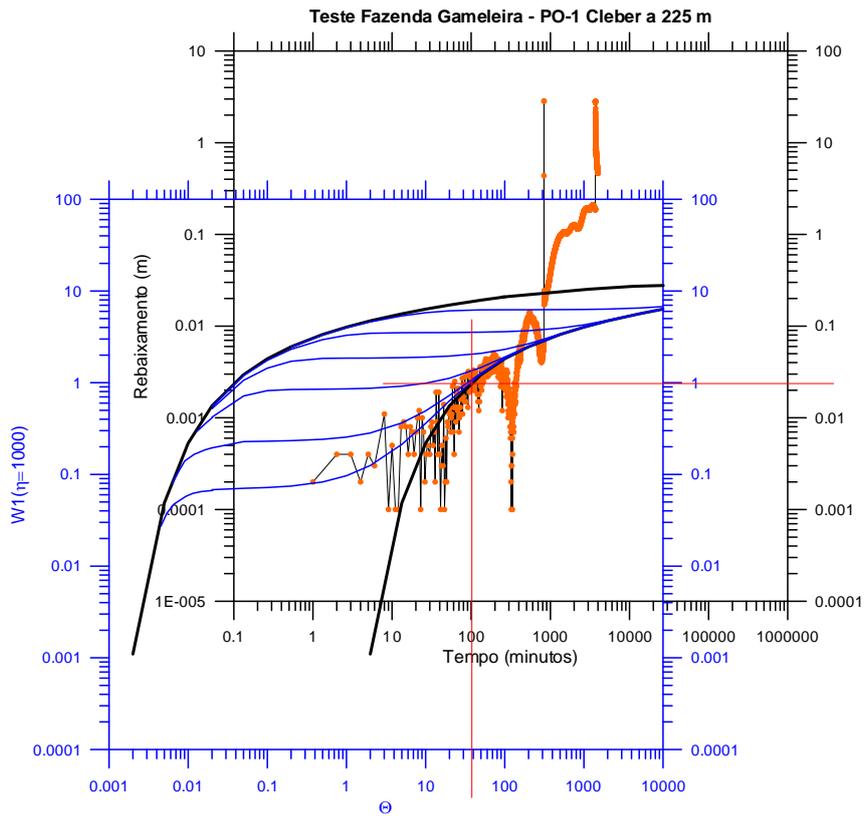
**Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-3.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,63E-03	2,41E-05	1,267	1,29E-06

### 6.1.1.5 Poço observado PO-1 – Cleber Fazenda Gameleira a 225 m



**Figura 6.12: Interferências registradas no poço observado PO-1, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.**



**Figura 6.13: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-1, no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.**

### 6.1.1.6 Poço observado PO-2 – Valdenir Fazenda Gameleira a 423 m

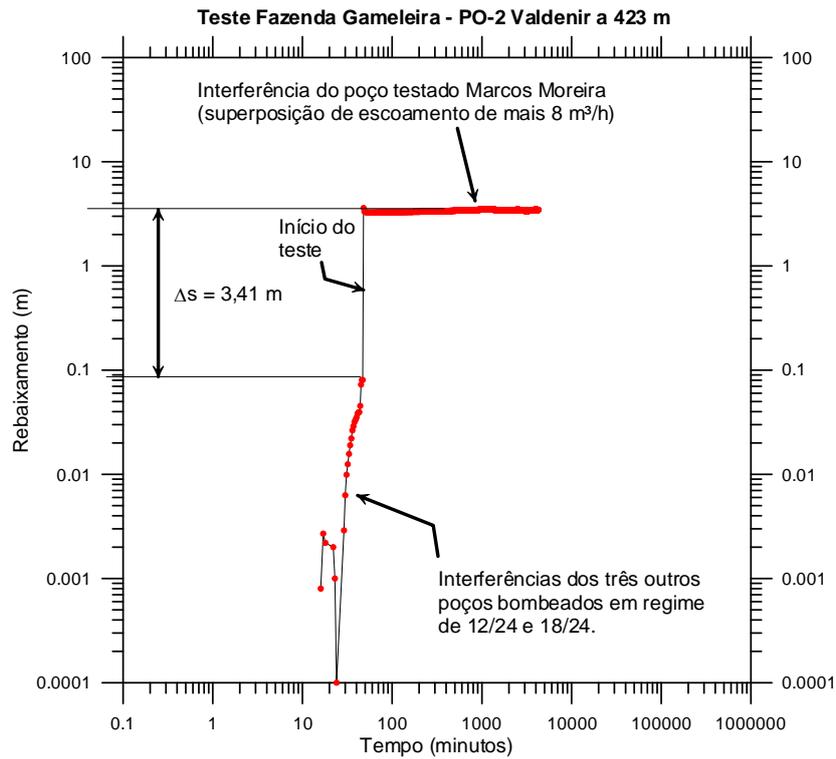


Figura 6.14: Interferências registradas no poço observado PO-2, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.

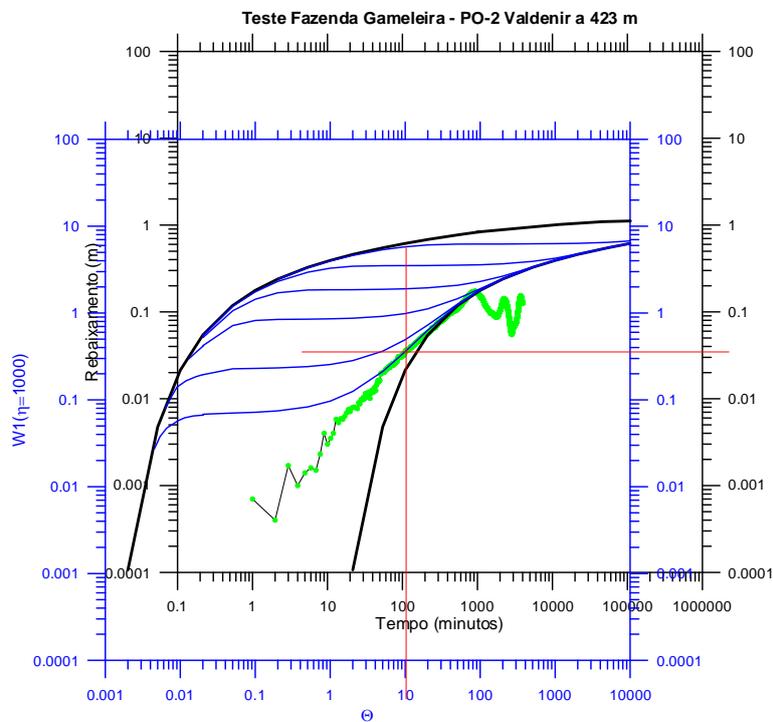


Figura 6.15: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-2, no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.

### 6.1.1.7 Poço observado PO-3 – Ananias Fazenda Gameleira a 986 m

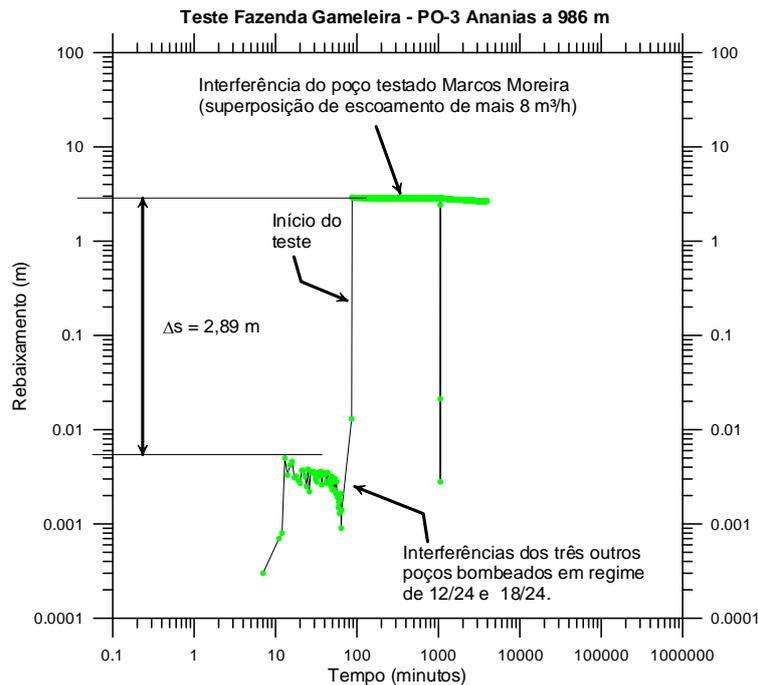


Figura 6.16: Interferências registradas no poço observado PO-3, antes e durante o teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.

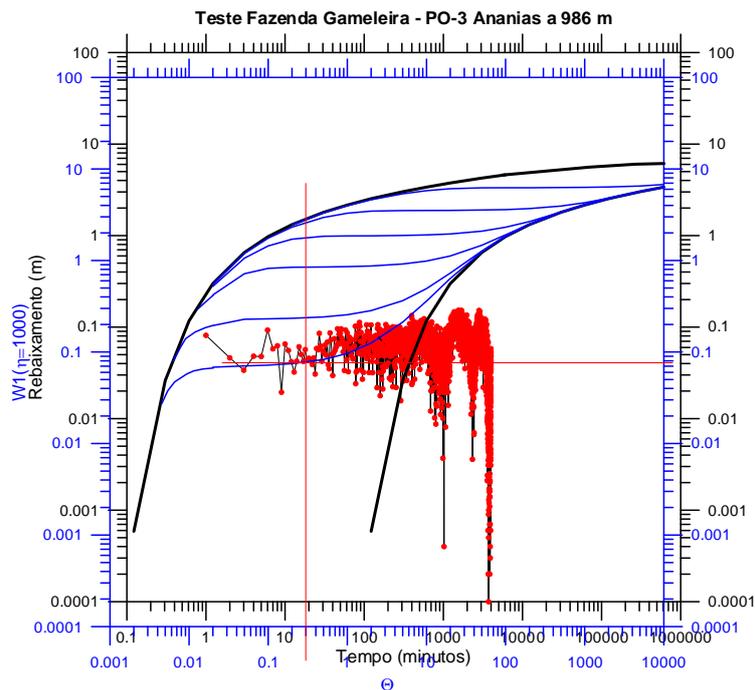
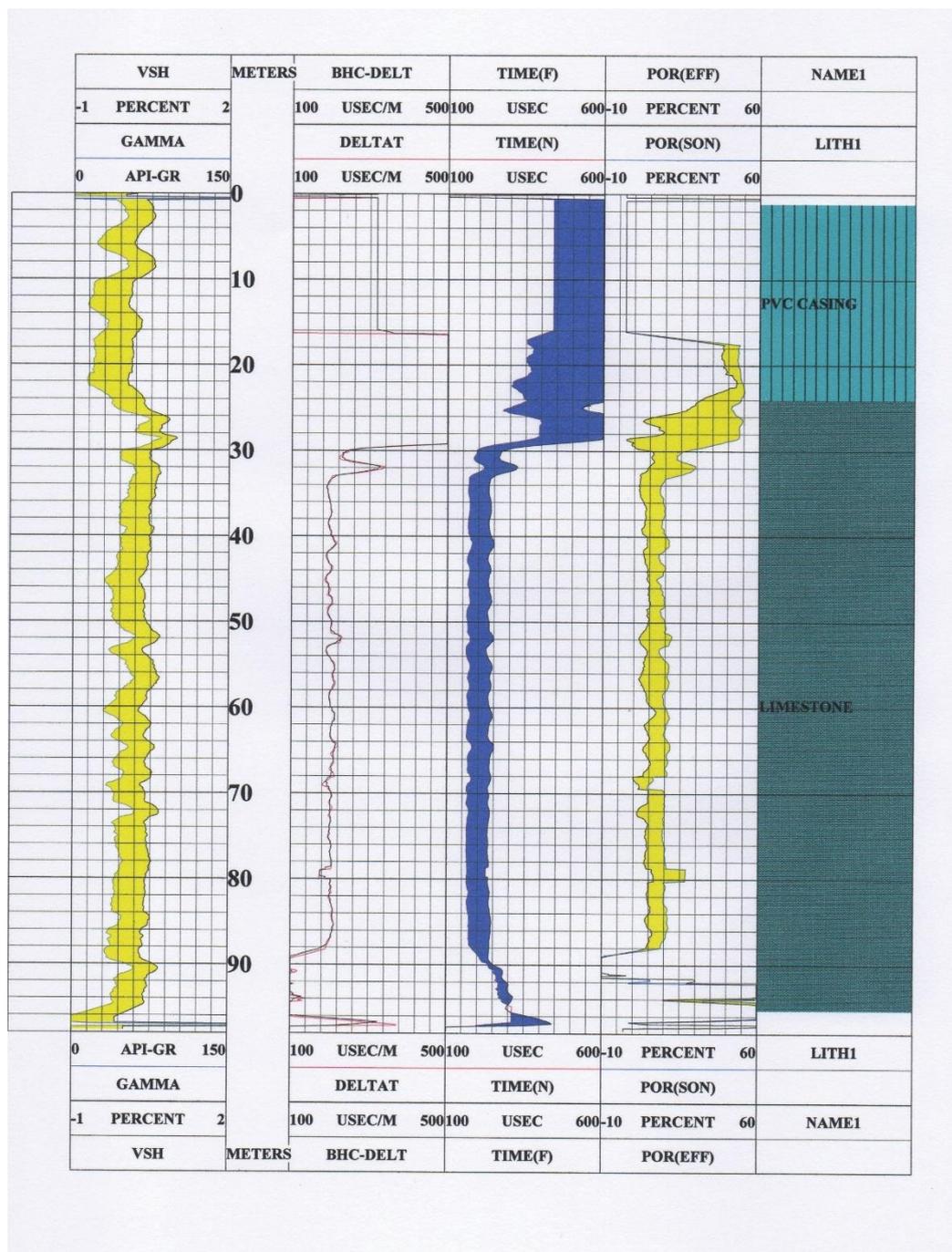


Figura 6.17: Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos no poço observado PO-3 no teste de bombeamento do poço Marcos Moreira, na Fazenda Gameleira.

### **6.1.2 Teste Fazenda Israel– Uibaí/BA**

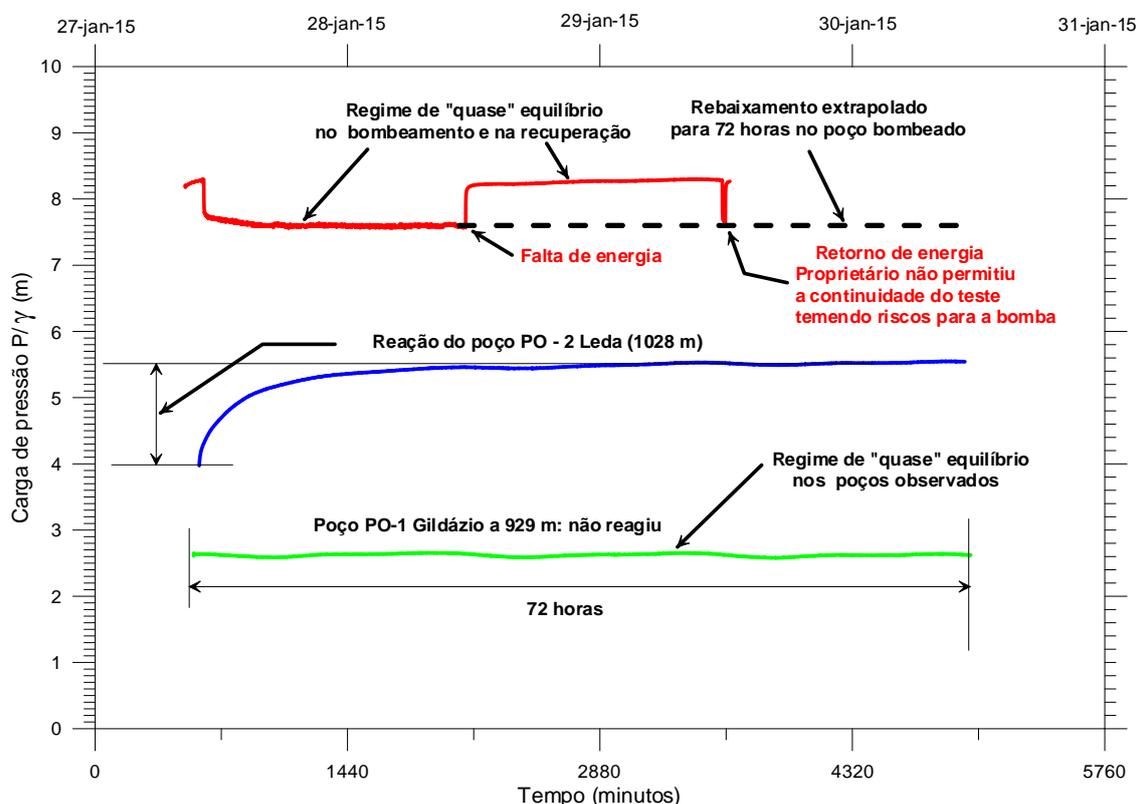
Realizado entre os dias 27.01.2015 e 29.01.2015, o dispositivo de poços existentes na área da Fazenda Israel foi realizado utilizando o condutor hidráulico cárstico-fissural como o poço bombeado (PB Gildázio), e 3 (três) outras unidades, PO Leda (a 1028 m), PO Gildázio (a 929 m) e PO Marcondes (a 863 m).

Não foi encontrado no SIAGAS perfil litológico e construtivo do poço bombeado na Fazenda Israel – BA. O perfil apresentado na Figura 5.18 corresponde a uma perfilagem gama que também indica o perfil construtivo com 20 m de revestimento em PVC e o intervalo restante (de 20 a 98 m) sem revestimento. Quanto à litologia a referida perfilagem indica a ocorrência de calcários do Grupo Bambuí, que provavelmente se estendem desde a superfície do terreno até a profundidade final do poço, que é de 98 m constituindo um aquífero cárstico fissurado que também pode ser entendido como um condutor hidráulico sem indicação das profundidades de entrada de água.



**Figura 6.18: Perfilagem gama e litologia do poço bombeado PB Gildázio (J-038P) na Fazenda Israel mostrando que o mesmo tem 98 m de profundidade, contendo 20 m de revestimento em PVC e o intervalo restante diretamente no calcário Bambuí.**

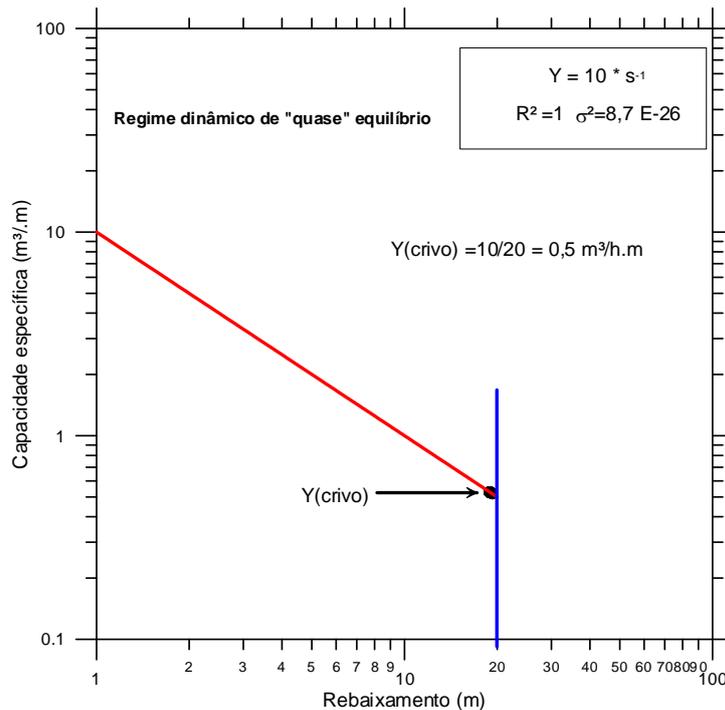
Embora o teste tenha sido encerrado mais cedo do que o previsto (72 horas) por falta de energia após 25 horas de bombeamento, os registros fornecidos pelos sensores após 72 horas nos poços observados comprovam que o condutor hidráulico cárstico-fissural já se encontra em regime de “quase” equilíbrio e, portanto, admite-se que o rebaixamento medido após 25 horas no poço bombeado pode ser extrapolado para 72 horas, como mostrado na Figura 6.19.



**Figura 6.19: Variação das cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Israel – Uibaí/BA - onde se vê que o poço bombeado e os observados se acham em regime dinâmico de “quase” equilíbrio.**

### Capacidade específica - Fazenda Israel

O teste do poço bombeado no teste da Fazenda Israel – BA foi realizado com vazão constante de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com  $D=1$  (Figura 6.20). Em regime praticamente de equilíbrio, tem-se uma capacidade específica decrescente de  $10 \text{ m}^3/\text{h.m}$  (com rebaixamento de 1 m) para  $0,5 \text{ m}^3/\text{h.m}$  (com 20 m de rebaixamento).



**Figura 6.20: Capacidade específica de 0,5 m³/h.m do poço bombeado na Fazenda Israel para 20 m de rebaixamento superpondo uma vazão de 10 m³/h ao condutor hidráulico existente em regime dinâmico de “quase” equilíbrio.**

### Parâmetros Hidrodinâmicos

Os parâmetros hidrodinâmicos do condutor hidráulico são estimados no poço bombeado PB-Gildázio e nos poços observados PO-1 Gildázio, (a 929 m) e PO-2 Leda, a 1028 m de distância. A estimativa é precária devido ao regime influenciado por outros poços em bombeamento, além dos observados.

#### 6.1.2.1 Poço bombeado PB Gildázio

Os efeitos do bombeamento de outros poços no poço o testado são ilustradas na Figura 6.21 e permitem verificar que a interpretação utiliza neste caso, o princípio de superposição dos escoamentos. A coincidência da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado PB Gildázio com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.22), permitiu obter os parâmetros indicados Tabela 6.10.

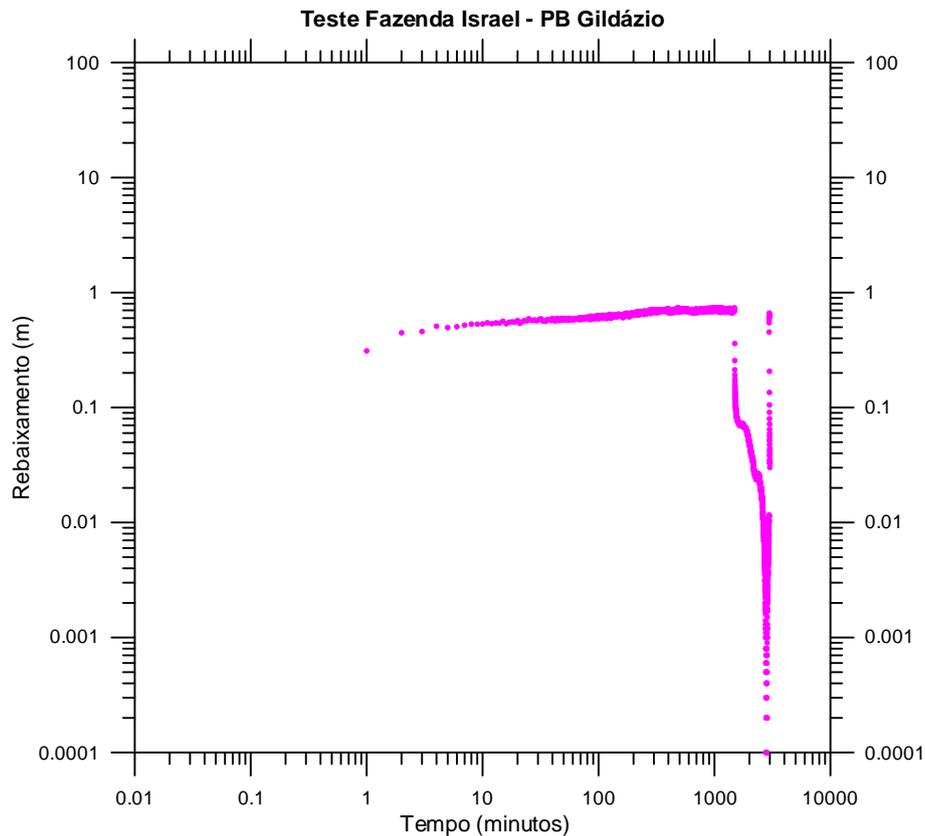
**Tabela 6.10 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado PB Gildázio para vazão constante de 10 m³/h na Fazenda Israel município de Uibaí/BA.**

Teste	Q m³/s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
<b>PB-Gildázio Faz. Israel</b>	2,78E-03	1080	0,6	100	6	100	0,05	1

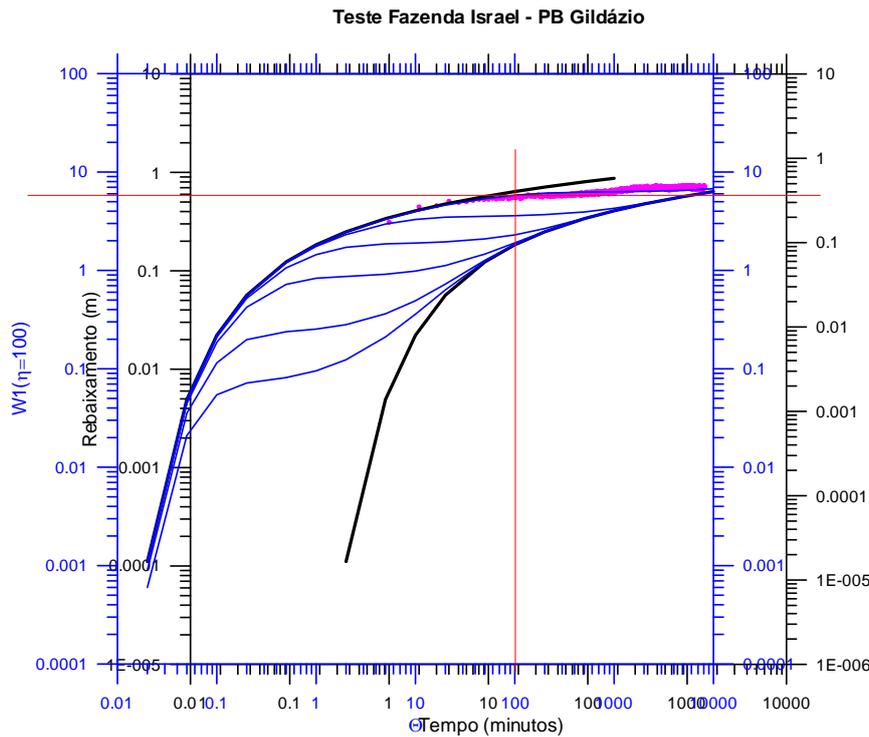
**Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado Gildázio na Fazenda Israel, município de Uibaí/BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,55E-03	7,43E-03	1,246	1,24E-06

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



**Figura 6.21: Rebaixamento e recuperação com o tempo no poço PB – Gildázio bombeado com vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/h, superposta a escoamentos anteriores.**



**Figura 6.22: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado Gildázio, na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

### 6.1.2.2 Poços de observação PO-1 – Gildázio a 929 m

Para esse poço de observação, o melhor ajuste na superposição da curva de campo foi com a curva da função Barenblat *et al* 1960, também usada para meio fraturado (Figura 6.23), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.12. Os parâmetros hidrodinâmicos de transporte, armazenamento e abertura das fraturas obtidos a partir da Figura 6.24 são mostrados Tabela 6.13.

**Tabela 6.12 – Parâmetros da função de Barenblat *et al* 1960 obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO -1 Gildázio na Fazenda Israel município de Uibaí - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
PO-1 Gildázio 929	2,78E-03	6300	0,42	10	1,5	-	1	1

**Tabela 6.13 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO-1 Gildázio a 929 m de distância na Fazenda Israel, município de Uibaí – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
2,23E-02	2,31E-06	0,996	7,94E-07

### 6.1.2.3 Poços de observação PO-2 – Leda a 1028 m

A superposição da curva de rebaixamento obtida no poço observado PO-2-Leda a 1028 m de distância com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.25), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.14. Os parâmetros hidrodinâmicos de transporte, armazenamento e abertura das fraturas obtidos a partir da Figura 6.26 são mostrados Tabela 6.15.

**Tabela 6.14 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO Leda para vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/h na Fazenda Israel município de Uibaí/BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	□	W□	□	r/B	D
PO-2 Leda 1028	2,78E-03	6000	0,015	20	0,55	10	-	1

**Tabela 6.15 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO Leda a 1028 m de distância na Fazenda Israel, município de Uibaí – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
8,11E-03	9,21E-06	2,162	3,75E-06

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

### Poço bombeado PO-1 Gildázio a 929 m

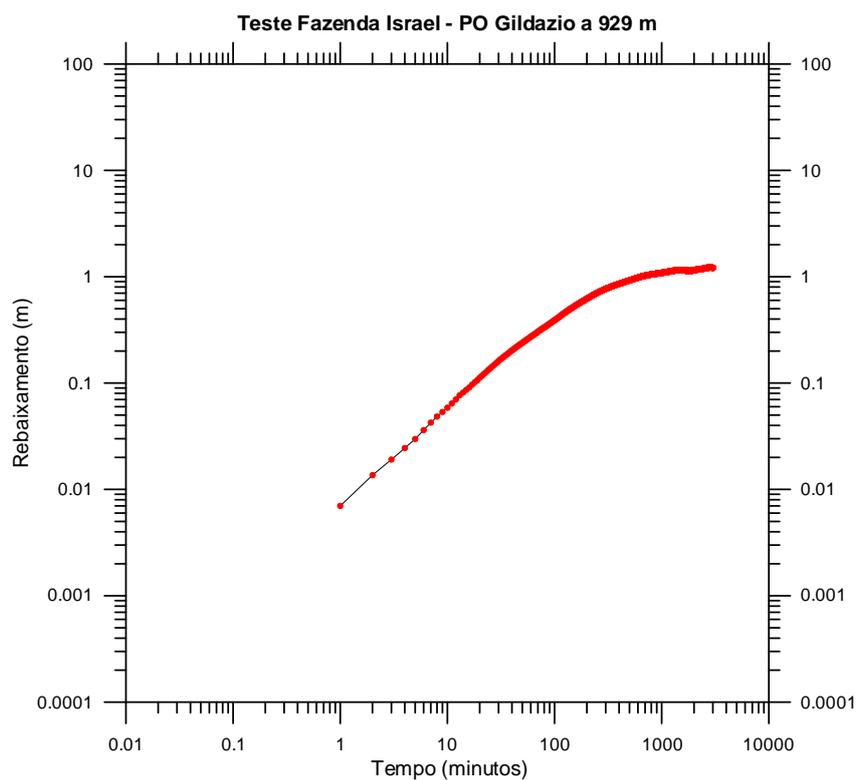


Figura 6.23: Gráfico de rebaixamento com o tempo no poço observado PO-1 – Gildázio a 929 m de distância, superposto a regime influenciado.

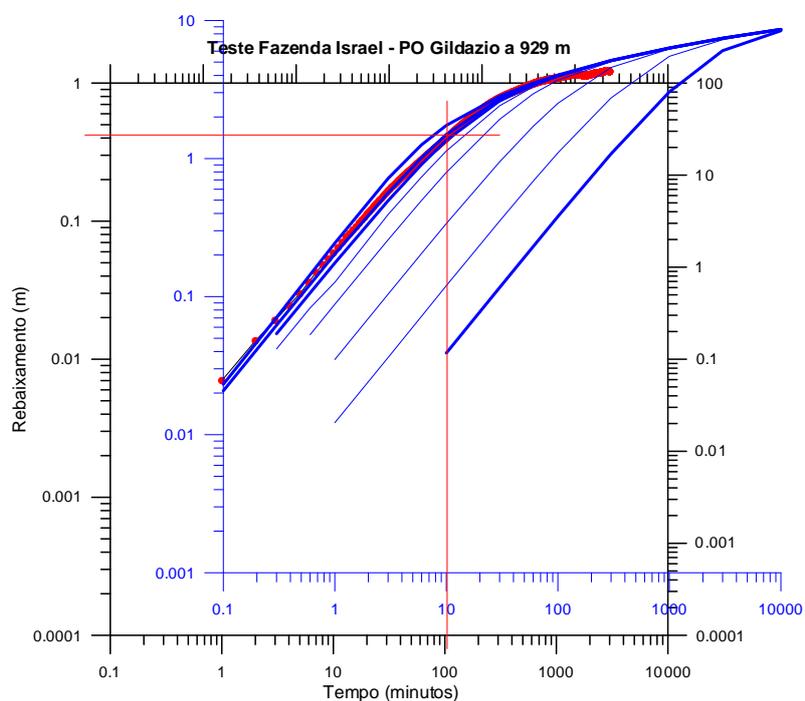
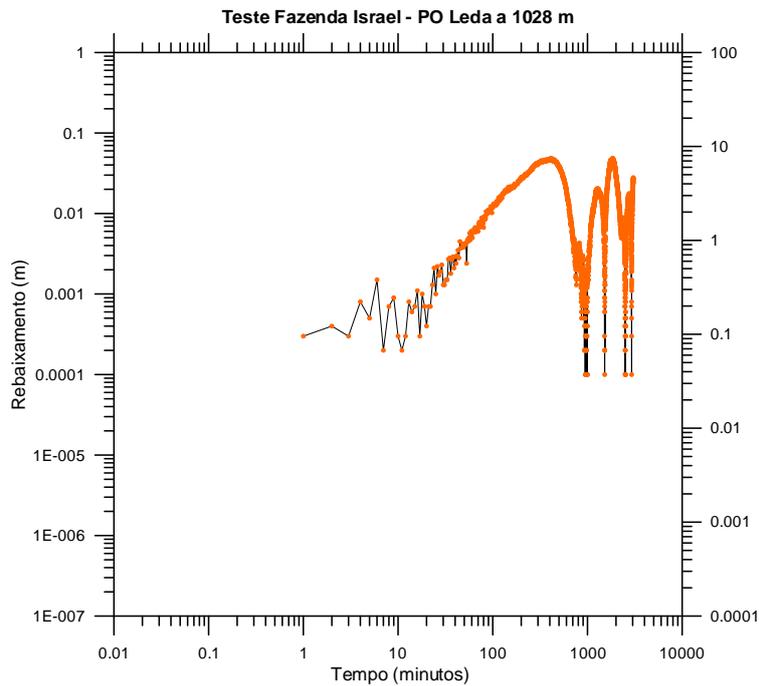
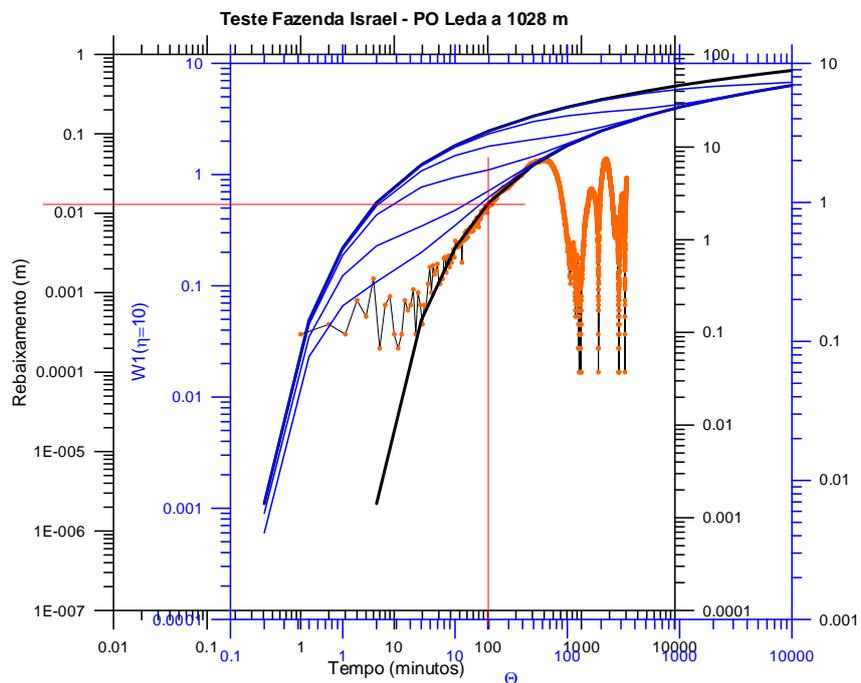


Figura 6.24: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-1 Gildázio, na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Barenblat *et al*, 1960.

### Poço observado PO Leda a 1028 m



**Figura 6.25: Gráfico de rebaixamento com o tempo no poço observado PO-2 Leda, superposto a regime influenciado por outros poços, além do bombeado com vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/s.**



**Figura 6.26: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-2 Leda a 1028 m de distância na Fazenda Israel, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton, 1963.**

### 6.1.3 Teste Fazenda Jatobá – Uibaí/BA

Realizado entre os dias 14.12.2014 e 18.12.2014. O dispositivo de poços existentes na área da Fazenda Jatobá onde foi realizado o teste do condutor hidráulico cárstico-fissural além do poço bombeado inclui 3 (três) outras unidades: PO-1 a 43 m, PO-2 a 48 m e PO-3 a 99 m.

A Figura 6.27 apresenta uma vista panorâmica do vale onde se localizam os 4 (quatro) poços constituintes do dispositivo usado no monitoramento dos níveis de água durante o teste de bombeamento.

A Figura 6.28 mostra uma barragem no mesmo vale a uma distância de 139 m a montante do dispositivo de observação. Essa barragem constitui uma fonte potencial de recarga do underflow e pode ter influenciado nas interferências entre os poços uma vez que os dois poços mais próximos à mesma (PO-1 e PO-2), não reagiram ao bombeamento.

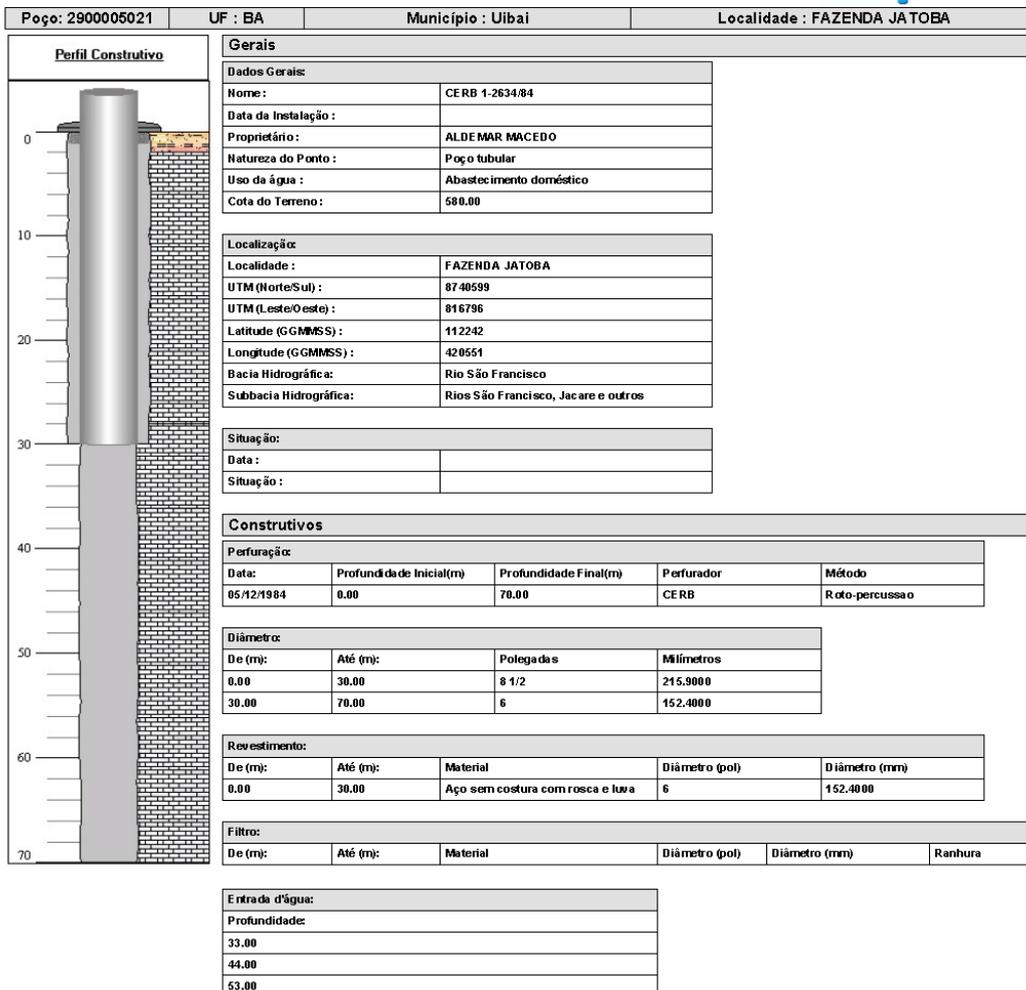
O perfil litológico e construtivo do poço bombeado na Fazenda Jatobá corresponde ao perfil apresentado na Ficha Técnica Completa do Poço 2900005021 do Sistema de Informação de Água Subterrânea da CPRM/SIAGAS, e CERB 1-2634/84 conforme é ilustrado na Figura 5.29. Quanto à litologia, a ficha técnica do poço indica uma fina cobertura argilosa que se estende da superfície do terreno até a profundidade de 2 m. No intervalo de 2 a 70 m (profundidade final do poço) ocorrem calcários do Grupo Bambuí que constituem um aquífero cárstico fissurado que na presente interpretação é entendido como um condutor hidráulico, com entradas de água registradas nas profundidades de 33 m, 44 m e 53 m.



**Figura 6.27: Vista geral do vale onde se localizam os 4 (quatro) poços envolvidos no teste de aquífero. Da esquerda para direita, mostra-se o Poço Bombeado PB, Poço Observado 1; Poço Observado 2 e Poço Observado 3. Ao fundo, a barragem a montante dos poços.**



**Figura 6.28: Barragem construída no início do ano de 2014 já com bastante água acumulada no momento do teste. Ainda não “sangrou”. Esta barragem fica 139 m a montante dos poços mostrados na Figura 6.29.**

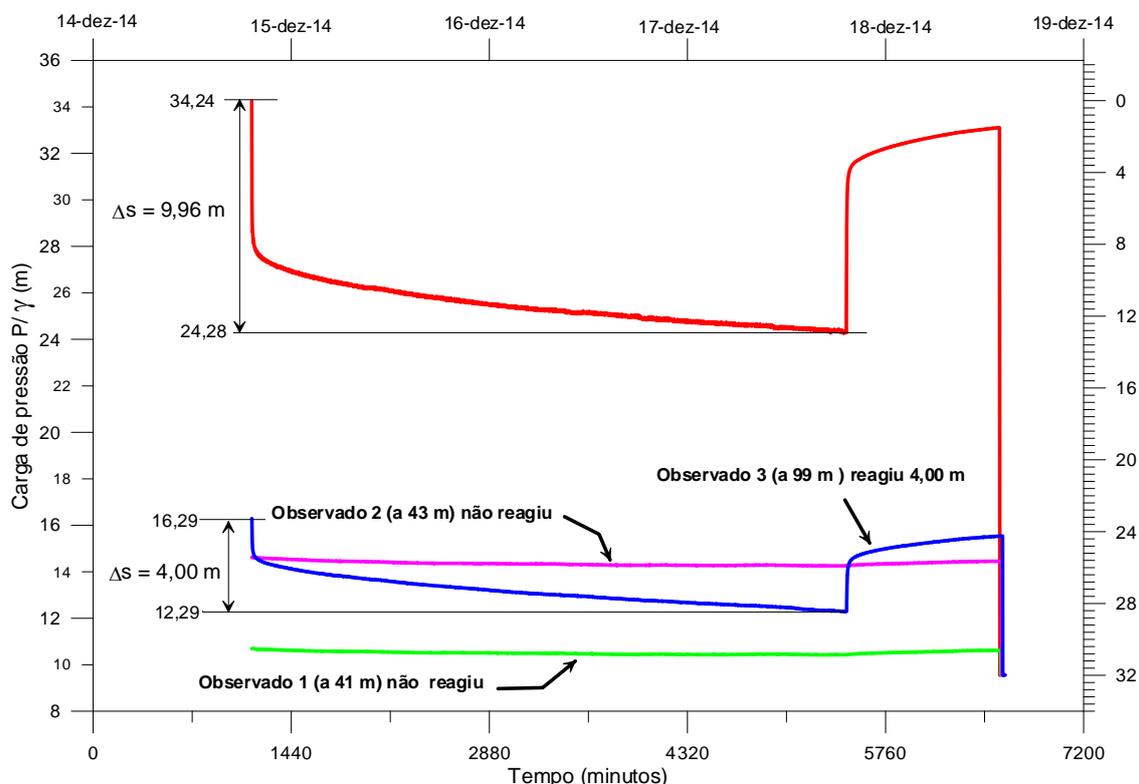


**Figura 6.29: Perfil litológico e construtivo do poço da Fazenda Jatobá CPRM SIAGAS 2900005021 em condutor hidráulico do SAB com entradas de água a 33,0, 44,0 e 53,0 m de profundidade.**

### Cargas de pressão registradas nos poços da Fazenda Jatobá

O monitoramento das cargas de pressão no poço bombeado e nos 3 (três) poços observados na Fazenda Jatobá foi realizado através de sensores transdutores de pressão no período de 14 a 19 de dezembro de 2014. No poço bombeado para uma vazão constante de 19,5 m<sup>3</sup>/h o rebaixamento após 72 horas foi de 9,96 m. Como pode ser visto na Figura 6.30, os poços observados PO-1 e PO-2 situados a pequenas distâncias de 41 e 43 m, respectivamente, não reagiram, sugerindo provavelmente uma falta de conexão com o condutor hidráulico testado ou talvez uma influência da barragem existente a montante, como visto nas Figura 6.27 e 6.28. Já o poço PO-3 situado a 99 de distância apresentou uma reação de 4 m, que comprova estar esse poço no mesmo condutor hidráulico do poço bombeado. Com isso fica plenamente caracterizada a heterogeneidade do meio cárstico fissural e a constatação de

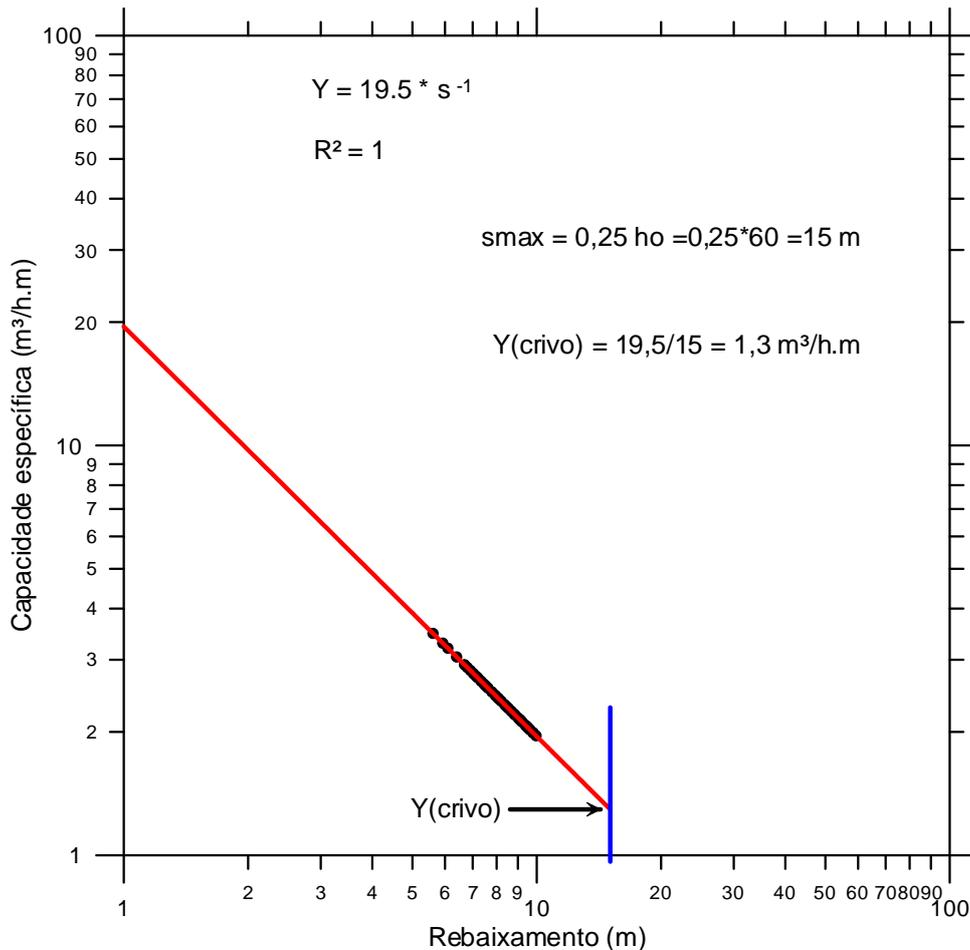
que o fluxo subterrâneo nesse ambiente é, sobretudo, canalizado através dos condutos fraturados e das aberturas de dissolução que configuram o meio cárstico.



**Figura 6.30: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Jatobá – município de Uibaí/BA.**

### Capacidade específica - Fazenda Jatobá

O teste do poço bombeado no teste da Fazenda Jatobá – BA foi realizado com vazão constante de  $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$  razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com  $D=1$ . Tem-se, neste caso, uma capacidade específica decrescente de  $20 \text{ m}^3/\text{h.m}$  (com 1 m de rebaixamento), para  $1,3 \text{ m}^3/\text{h.m}$  com 15 m de rebaixamento (Figura 6.31). O poço tem 70 m de profundidade e nível estático próximo de 9,77 m, ou seja, da ordem de 10 m o que corresponde a uma espessura saturada de 60 m. O rebaixamento máximo recomendável para exploração corresponde a 25% da espessura saturada, ou seja, é igual a 15 m. Esse resultado sugere que o poço já está funcionando de acordo com as condições recomendadas, isto é, com vazão de  $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Figura 6.31: Capacidade específica do poço bombeado no teste da Fazenda Jatobá, município de Uibaí/BA com vazão constante de 19,5 m³/h.**

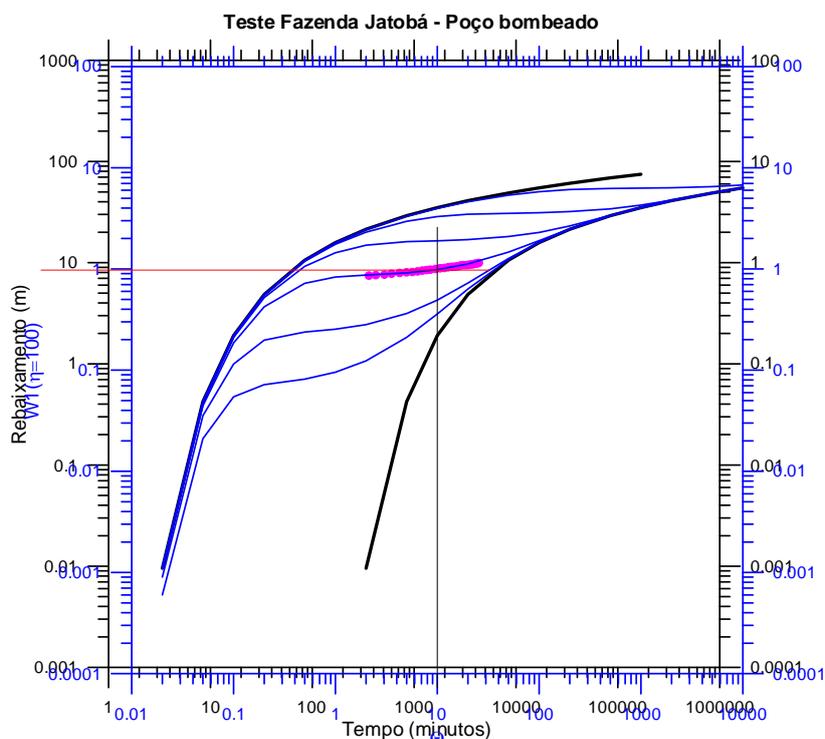
### Parâmetros Hidrodinâmicos

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do condutor hidráulico são estimados no poço bombeado e no observado PO-3 a 99 m de distância, uma vez que os poços observados PO-1 a 41 m e PO-2 a 43 m de distância, embora mais próximos, não reagiram, como já mostrado na Figura 6.27. Embora esta seja uma situação típica de meios muito heterogêneos como são os cársticos, vale ainda mencionar problemas de bombeamento em outros poços existentes na área e que não foram monitorados.

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado na Fazenda Jatobá com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.32), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.16, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na tabela 6.17.

**Tabela 6.16 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante (dimensão D=1) de 19,5 m<sup>3</sup>/h na Fazenda Jatobá, município de Uibaí - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	θ	Wθ	η	r/B	D
Poço bombeado	5,42E-03	108000	8,5	10	1	100	1	1



**Figura 6.32: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado na Fazenda Jatobá, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

**Tabela 6.17 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Jatobá, município de Uibaí – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
5,07E-05	2,19E-02	0,399	1,27E-07

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

### 6.1.3.1 Poço observado PO-3 a 99 m na Fazenda Jatobá

A superposição da curva de rebaixamento do poço PO-3 na Fazenda Jatobá com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.33), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.18. Os parâmetros de transporte e armazenamento e a abertura média das fraturas são mostrados na Tabela 6.19.

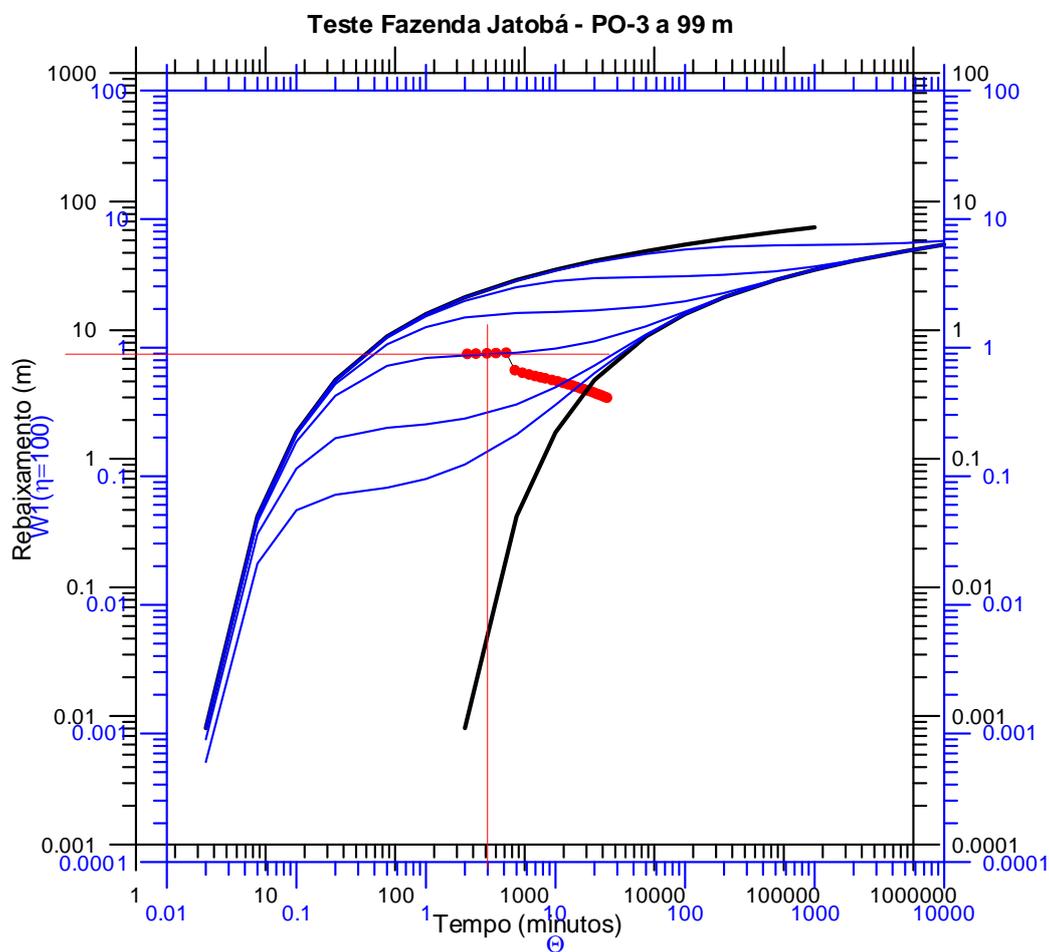
**Tabela 6.18 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-3 na Fazenda Jatobá, município de Uibaí - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	$\theta$	W $\theta$	$\eta$	r/B	D
PO-3 a 99 m	5,42E-03	30600	6,5	3	0,3	100	1	1

**Tabela 6.19 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço de observação PO-3 na Fazenda Jatobá, município de Uibaí – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,99E-05	8,13E-03	0,292	6,81E-08

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



**Figura 6.33: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-3 a 99 m de distância na Fazenda Jatobá, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

Nota-se na curva de campo do PO-3 que até o tempo de 510 minutos (8 h e 30 minutos) os pontos coincidem perfeitamente com uma das curvas da função de Boulton, mas desse tempo em diante até o final do teste de 72 horas se manteve recuperando, o que sugere ter havido a parada de algum poço da área ou de suas proximidades, não identificado no sítio do teste.

#### 6.1.4 Teste Fazenda Morro Pelado I - Lapão BA

Realizado entre os dias 13.01.2015 e 17.01.2015. O dispositivo de poços existentes na área da Fazenda Morro Pelado onde foi realizado o teste do condutor hidráulico cárstico-fissural (Figura 6.5) além do poço bombeado PB Hugo incluiu um poço de observação PO Hugo a 195 m de distância.

Durante testes de bombeamento de poços, a presença de água acumulada na superfície do terreno ou distribuída para irrigação de culturas nas proximidades, principalmente em terrenos cársticos é sempre uma fonte potencial de recarga canalizada tanto para o poço bombeado quanto para os poços de observação.

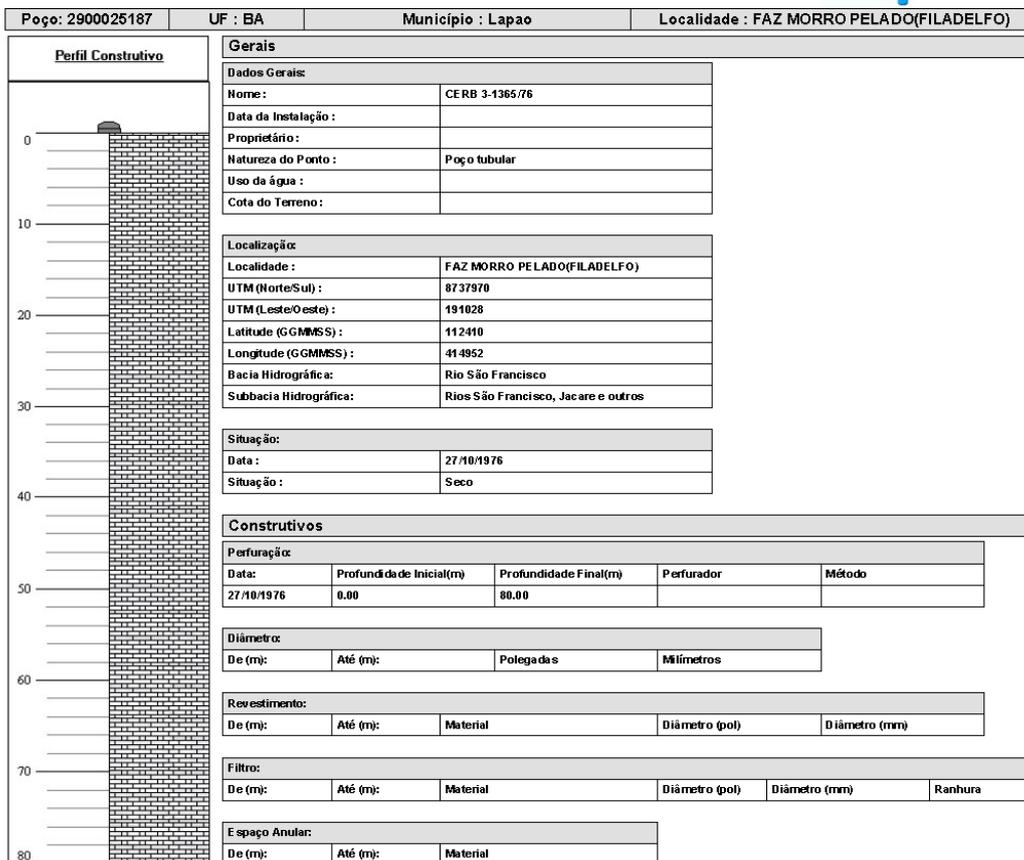
A Figura 6.34 mostra que a água bombeada foi lançada em um reservatório de superfície situado a cerca de 25 m de distância e a partir do qual (durante o próprio teste) foi distribuída através de microaspersores para um campo de lavoura a uma distância aproximada de 250 m, com o poço de observação a 195 m.



**Figura 6.34: Reservatório muito próximo (em torno de 25 m), do Poço PB HUGO no qual foi lançada a descarga da água do teste para armazenamento e distribuição por meio de microaspersores em campo de lavoura a 250 m de distância, na Fazenda Morro Pelado I.**

### **Perfil construtivo e litológico**

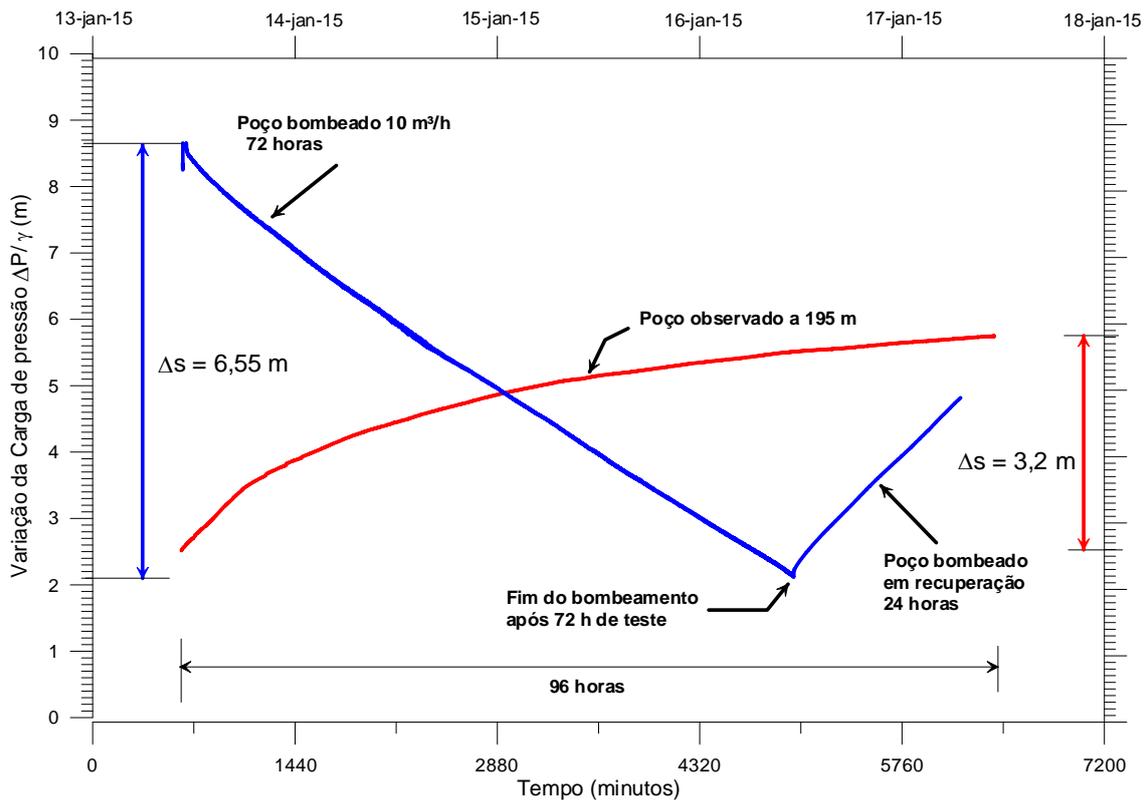
Segundo as informações obtidas em campo os dois poços utilizados no teste de aquífero não possuem perfis litológicos e nem perfis construtivos. Na mesma área, todavia, encontra-se o poço SIAGAS 29025187 nas coordenadas UTM 191028 E e 8737970 N, apenas com perfil litológico (Figura 6.35). Ainda assim, esse poço é representativo das condições hidrogeológicas da área onde todos os poços produtores são perfurados no condutor hidráulico cárstico fraturado que se desenvolve no Sistema Aquífero Bambuí (SAB).



**Figura 6.35: Perfil litológico do poço SIAGAS 2900025187 e CERB 3-1365/76 perfurado na Fazenda Morro Pelado, município de Lapão/BA.**

### Cargas de pressão nos poços da Fazenda Morro Pelado

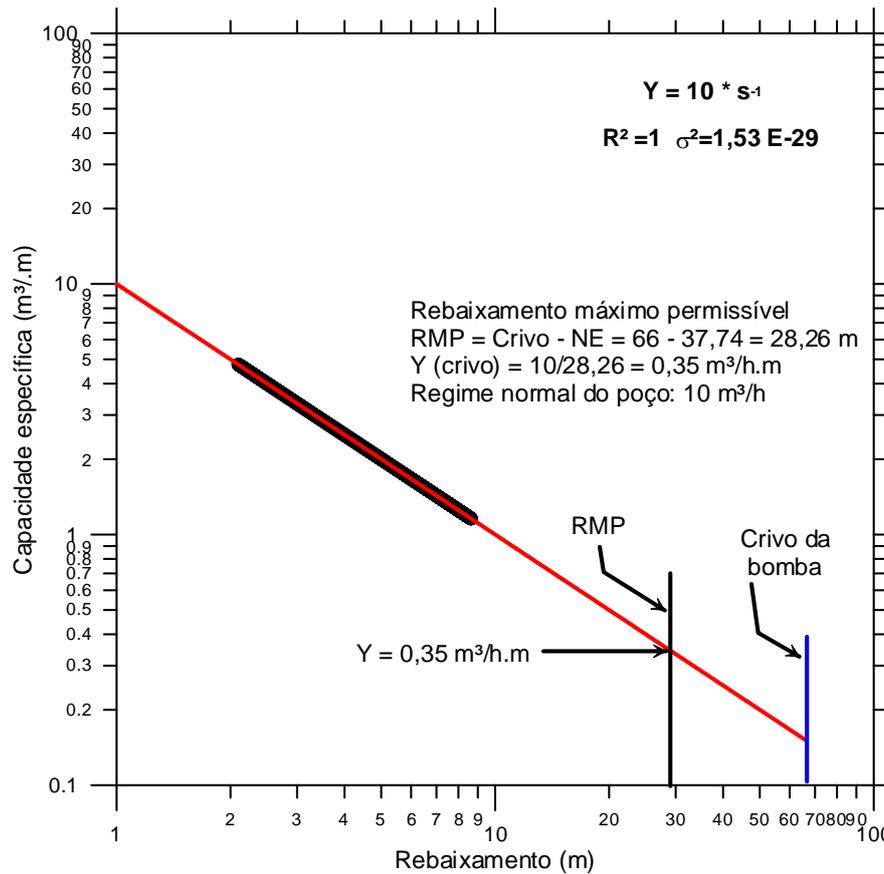
O monitoramento das cargas de pressão no poço bombeado e no poço observado na Fazenda Morro Pelado I foi realizado através de sensores transdutores de pressão no período de 13 a 18 de janeiro de 2015. No poço bombeado para uma vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/h o rebaixamento após 72 horas foi de 6,55 m, enquanto que o rebaixamento no poço observado a 195 m de distância foi de 3,2 m, como pode ser visto na Figura 6.36. A recuperação do nível do poço bombeado foi registrada durante um período de 24 horas, de modo que a duração total do teste foi 96 horas.



**Figura 6.36: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Morro do Pelado I.**

### Capacidade específica do poço bombeado na Faz. Morro Pelado

O teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA foi realizado com vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/h razão pela qual se obtém um rebaixamento de dimensão inteira com D=1 (Figura 6.37). Tem-se, neste caso, uma capacidade específica decrescente de 10 m<sup>3</sup>/h.m (para 1 m de rebaixamento) para 0,35 m<sup>3</sup>/h.m com um rebaixamento máximo permissível (RMP) de 28,26 m, pois o nível estático medido foi igual a 37,74 m com o crivo da bomba a 66 m de profundidade.



**Figura 6.37: Capacidade específica do poço bombeado no teste da Fazenda Morro do Pelado I para o RMP.**

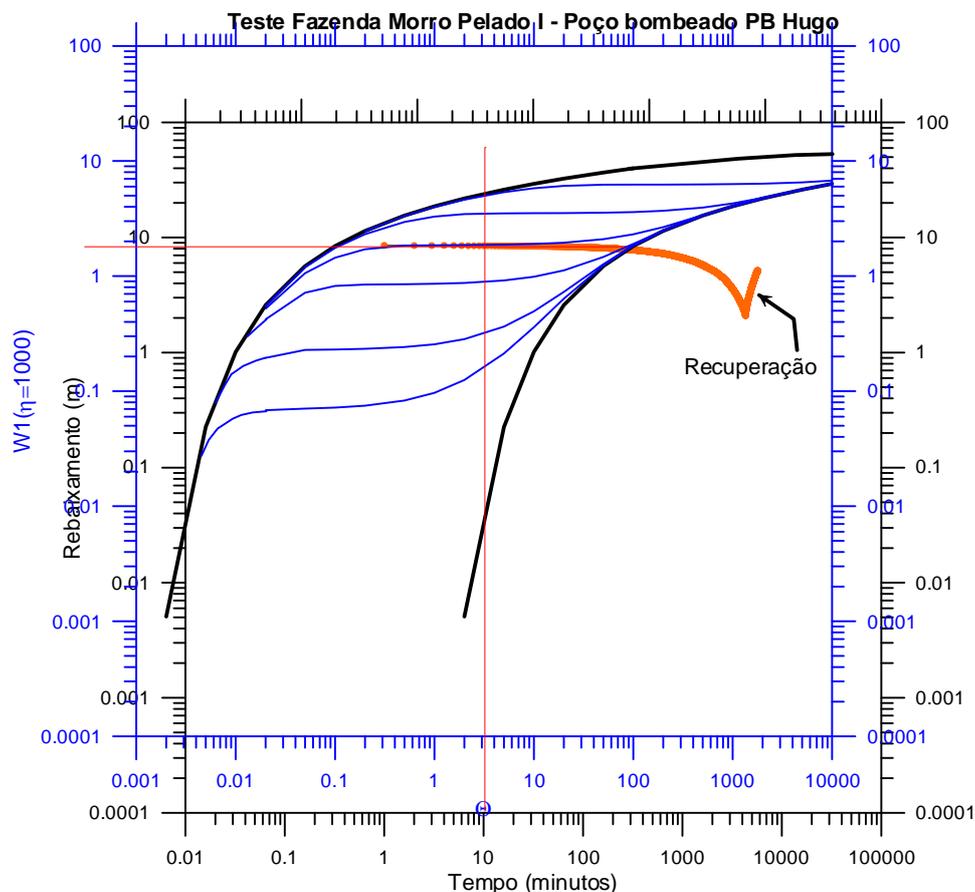
### Parâmetros Hidrodinâmicos

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do condutor hidráulico são estimados no poço bombeado PB Hugo e no observado PO Hugo a 195 m de distância.

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.38), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.20, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.21. Notar que a superposição foi feita para um tempo curto de 10 minutos porque após esse tempo até o final do teste, quando ocorreu a recuperação, o nível de água progressivamente se desviou para baixo provavelmente em resposta a uma recarga oriunda do reservatório de superfície existente a uma distância aproximada de 25 m como foi mostrado na Figura 6.37.

**Tabela 6.20 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante de 10 m³/h (dimensão D=1) na Fazenda Morro Pelado I município de Lapão - BA.**

Teste	Q m³/s	t seg	s (m)	$\theta$	W $\theta$	$\eta$	r/B	D
Poço bombeado PB Hugo	2,78E-03	600	8,5	3,1	1,8	1000	0,5	1



**Figura 6.38: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado PB Hugo, na Fazenda Morro Pelado I, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963. Notar que após os 10 minutos de bombeamento a curva se desvia para baixo indicando uma diminuição do rebaixamento provavelmente por influência de recarga induzida do reservatório mostrado na figura 6.37.**

**Tabela 6.21 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
4,68E-05	3,63E-04	0,389	1,21E-07

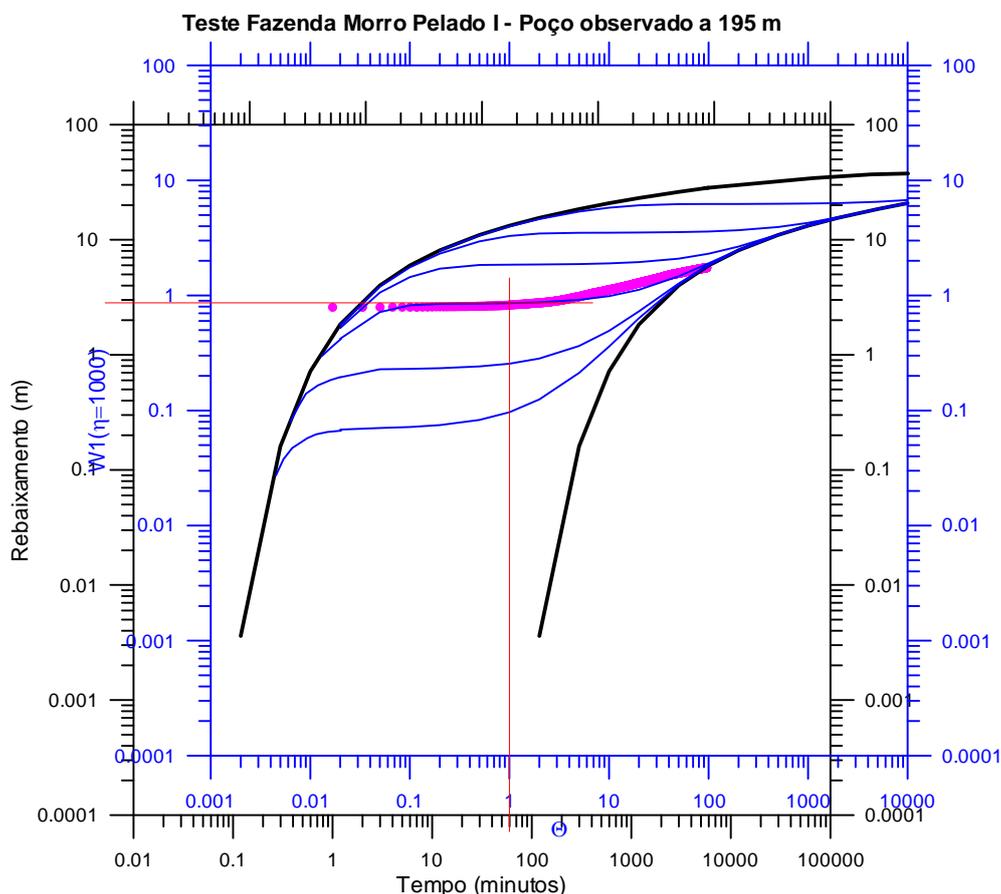
\*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

#### 6.1.4.1 Poço observado a 195 m de distância na Faz. Morro Pelado I

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.39), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.22, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.23.

**Tabela 6.22 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado com vazão constante de 10 m<sup>3</sup>/h (dimensão D=1) na Fazenda Morro Pelado I município de Lapão/BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	θ	Wθ	η	r/B	D
Poço observado PO Hugo	2,78E-03	3600	3,8	1	0,78	1000	1	1



**Figura 6.39: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO Hugo a (195 m de distância) na Fazenda Morro Pelado, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

**Tabela 6.23 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
4,54E-05	4,54E-06	0,385	1,18E-07

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

### **6.1.5 Teste Serrolândia – Presidente Dutra/BA**

Realizado entre os dias 20.01.2015 e 24.01.2015. O dispositivo de poços existentes na área da Fazenda Serrolândia onde foi realizado o teste do condutor hidráulico cárstico-fissural (Figura 6.5) além do poço bombeado PB João incluiu 3 (três) poços de observação: PO João a 122 m; PO Wecsley a 740 m e PO Lourival a 804 m de distância. Além desses 3 (três) poços de observação existem 2 (dois) outros poços ativos e que não foram observados: Poço Lomanto a 995 m operando em regime de 4 horas/dia com vazão de 8 m<sup>3</sup>/h e Poço Prefeitura a 1025 m, operando 1 hora/dia com vazão de 6,5 m<sup>3</sup>/h. Um quarto poço (PO Paulo), foi observado a 210 m de distância, mas ocorreu um acidente e os seus dados foram perdidos, pois durante a retirada do tubulação guia de 1” as três últimas barras de 6 m caíram no fundo do poço com o sensor.

#### **Perfil litológico e construtivo**

Na Figura 6.40 é apresentado o perfil litológico e construtivo do poço SIAGAS 29000023274 com 80 m de profundidade, catalogado na Fazenda Serrolândia; município de Presidente Dutra – BA, no ponto de coordenadas UTM 173354E e 8739361N. Esse perfil mostra no intervalo de 0 a 10 m, sedimentos argilosos de cobertura revestidos com tubos de 6”, e o intervalo restante (10 a 80 m) constituído de calcário Bambuí sem revestimento. O poço testado corresponde ao J-051P cadastrado no ponto de coordenadas 173811E e 8736559N, também com 80 m de profundidade e cujo perfil litológico indica como entradas de água do condutor hidráulico as profundidades de 11, 23 e 72 m.

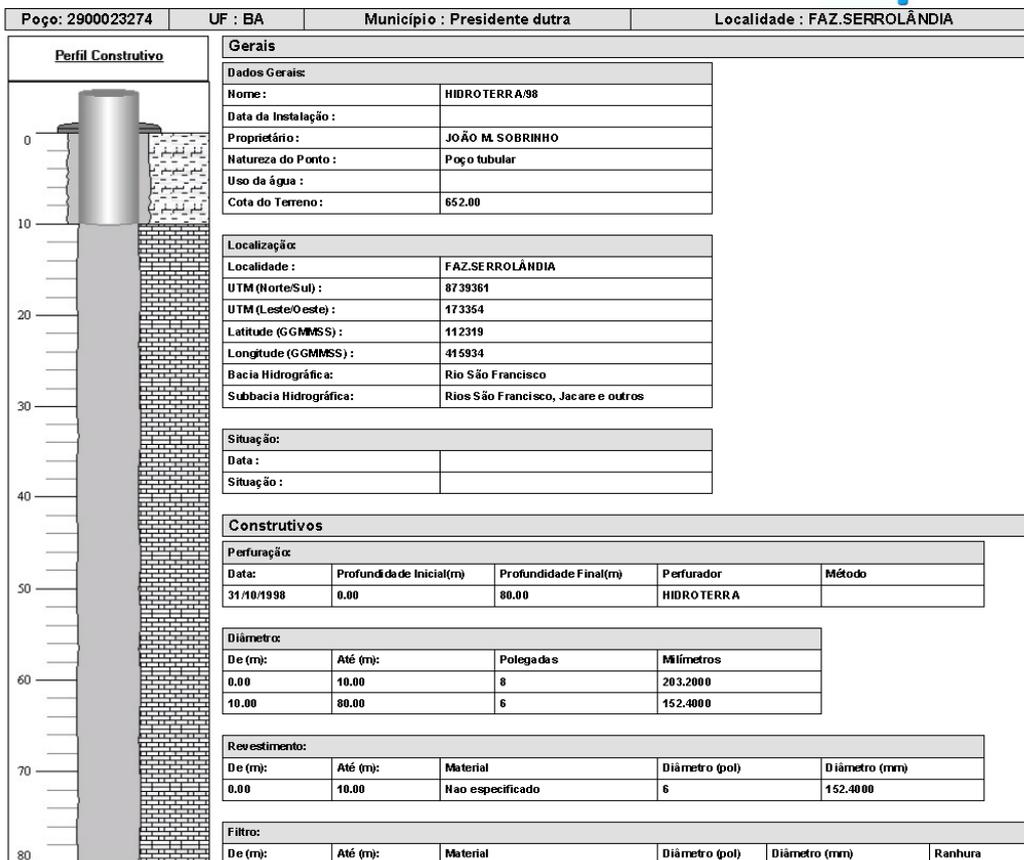
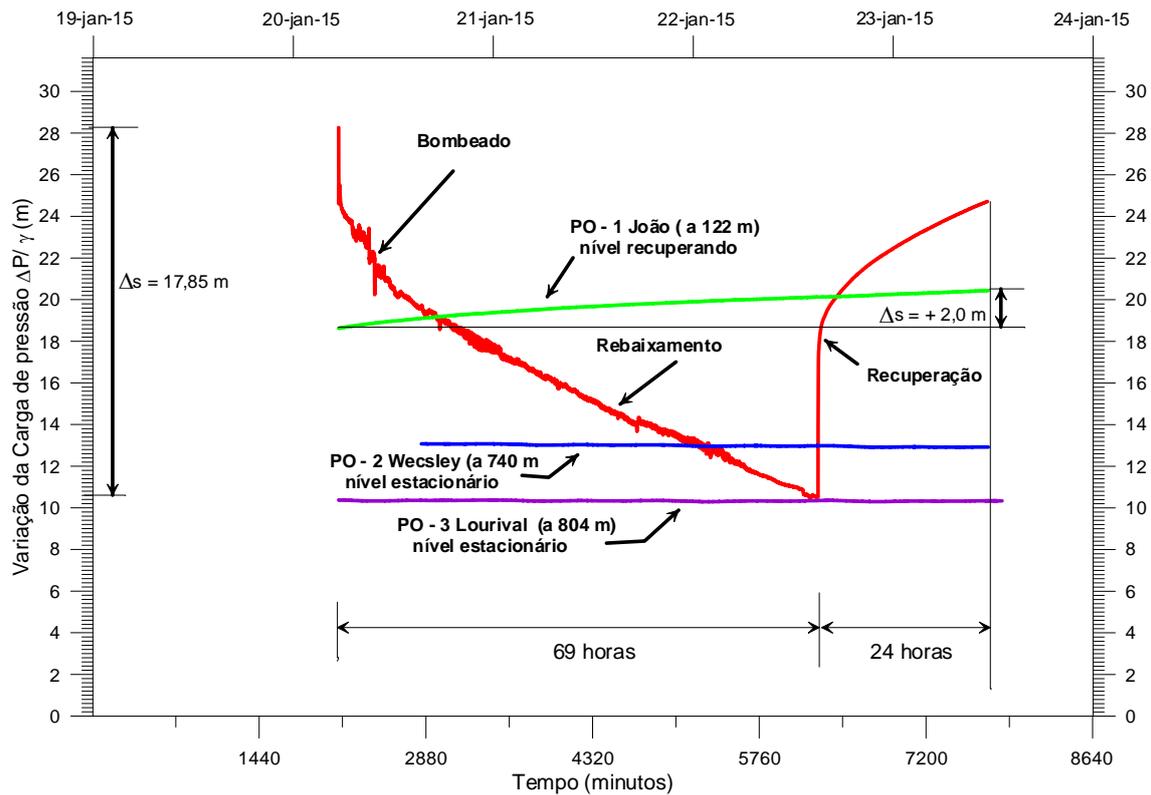


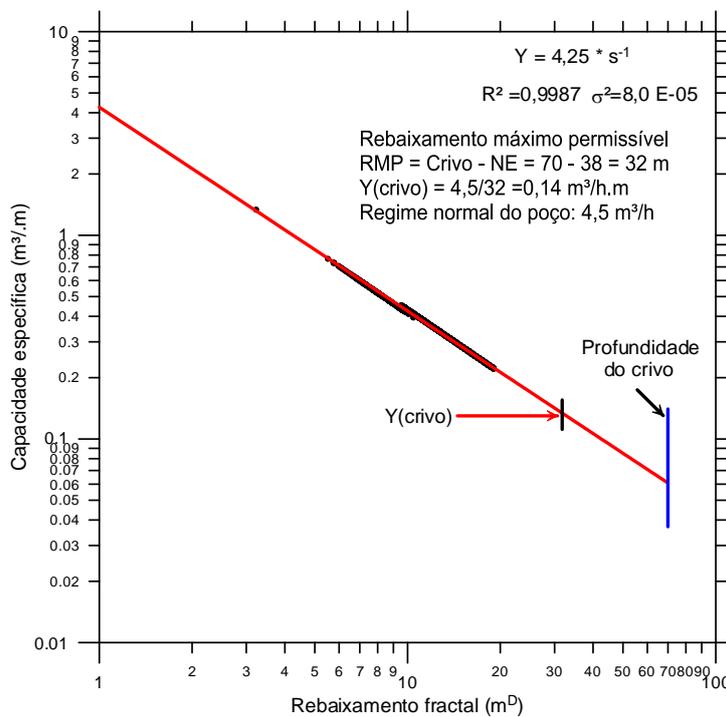
Figura 6.40: Perfil litológico e construtivo do poço.

### Cargas de pressão registradas nos poços da Faz. Serrolândia

O monitoramento das cargas de pressão no poço bombeado e nos poços observados na Fazenda Serrolândia foi realizado através de sensores transdutores de pressão no período de 19 a 24 de janeiro de 2015 (Figura 6.41). No poço bombeado para uma vazão constante de 4,5 m<sup>3</sup>/h o rebaixamento após 69 horas foi de 17,85 m, enquanto que o rebaixamento no poço PO-1 observado a 122 m de distância foi de + 2,0 m, ou seja, recuperou 2 metros e os poços PO-2 e PO-3 não reagiram, como pode ser visto na Figura 6.42. A recuperação do nível do poço bombeado foi registrada durante um período de 24 horas, de modo que a duração total do teste foi 93 horas.



**Figura 6.41: Cargas de pressão registradas durante o bombeamento e a recuperação no teste realizado na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.**



**Figura 6.42: Capacidade específica de  $0,14$   $m^3/h.m$  para o RMP no poço bombeado no teste da Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.**

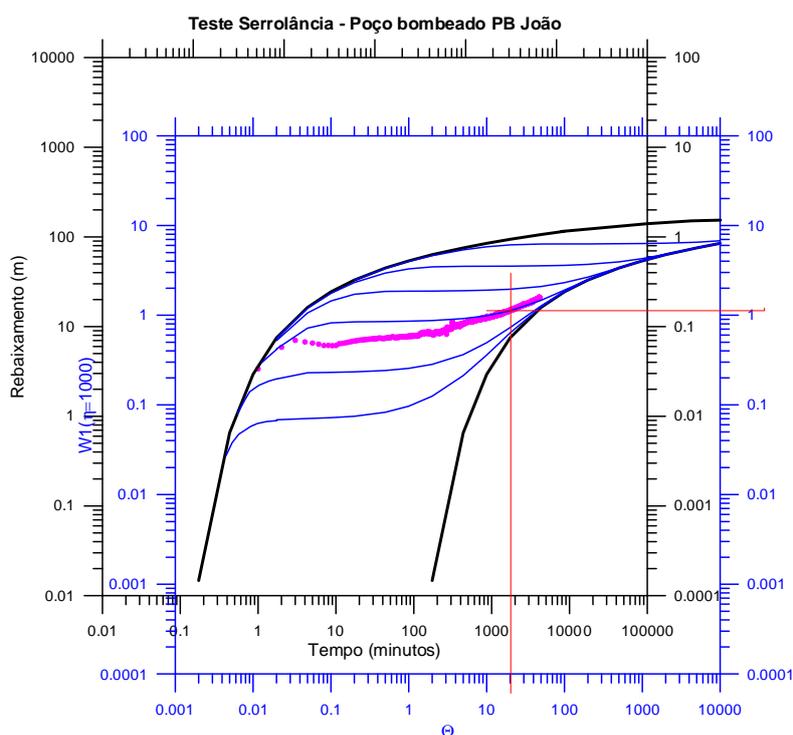
## Parâmetros hidrodinâmicos

Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos do condutor hidráulico são estimados no poço bombeado PB João e nos 3 (três) outros poços observados, PO-1 João, PO-2 Lourival e PO-3 Weclesley. Embora as interferências dos demais poços ativos dificultem a interpretação os registros obtidos pelos sensores permitem uma estimativa bastante satisfatória para fins práticos.

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço bombeado na Fazenda Serrolândia com a curva da função de Boulton para meio fraturado (Figura 6.43), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.24, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.25.

**Tabela 6.24 – Parâmetros da função de Boulton obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço bombeado na Fazenda Serrolândia com vazão constante de 4,5 m<sup>3</sup>/h (D=1).**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	θ	Wθ	η	r/B	D
Poço bombeado PB João	1,25E-03	64800	0,16	20	1	1000	1	1



**Figura 6.43: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço bombeado PB João na Fazenda Serrolândia, pelo método de superposição de escoamentos usando o modelo de Boulton 1963.**

**Tabela 6.25 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
6,22E-04	8,06E-02	0,919	6,76E-07

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

### 6.1.5.1 Poços de observação

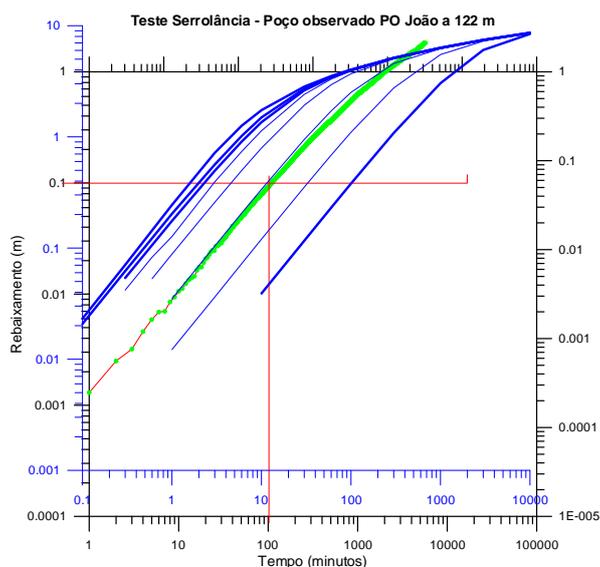
Convém observar que as curvas obtidas nos 3 (três) poços de observação não se ajustam à função de Boulton (1963) mas sim à função de Barenblat *et al* 1960, também desenvolvida para fluxo em meio fraturado.

- **Poço observado PO-1 a 122 m de distância na Fazenda Serrolândia**

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço observado PO-1 João, com a curva da função de Barenblat *et al* 1960 para meio fraturado (Figura 6.44), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.26, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.27.

**Tabela 6.26 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-1 observado na Fazenda Serrolândia município de Presidente Dutra - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	θ	Wθ	η	r/B	D
PO-1 João	1,25E-03	6000	0,1	12	0,39	-	0,2	1



**Figura 6.44: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-1 a 122 m de distância, em regime influenciado na Fazenda Serrolândia usando o modelo de Barenblat *et al* 1960.**

**Tabela 6.27 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço bombeado na Fazenda Morro Pelado I, município de Lapão – BA.**

Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
4,54E-05	4,54E-06	0,385	1,18E-07

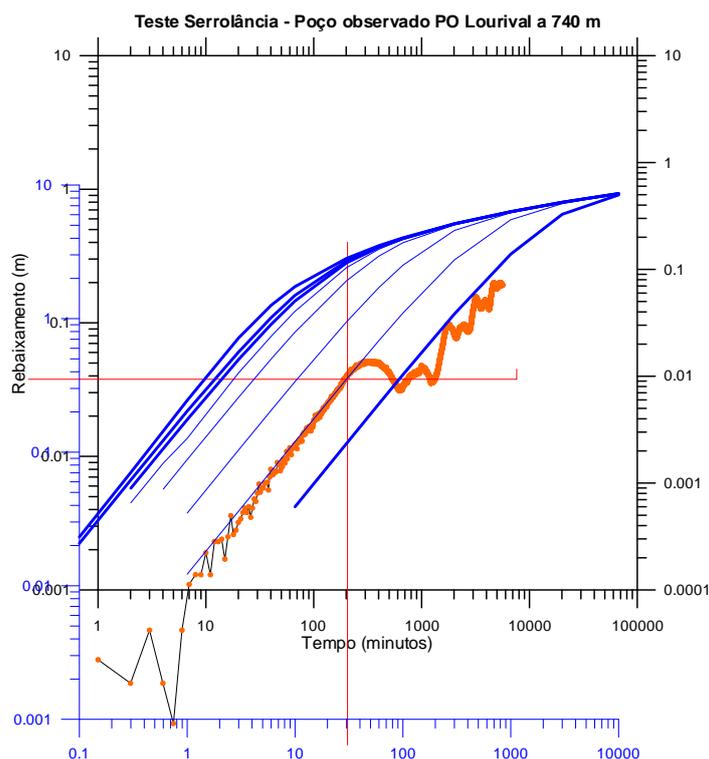
\*Tf = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

- **Poço observado PO-2 a 740 m de distância na Fazenda Serrolândia**

A superposição da curva de rebaixamento obtida no teste do poço observado PO-2 Lourival com a curva da função de Barenblat para meio fraturado (Figura 6.45), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.28, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.29. Notar que na curva da Figura 6.49, durante um bom tempo a curva de campo se ajusta perfeitamente à função de Barenblat para  $r/B = 0,1$  refletindo o comportamento do condutor hidráulico antes dos demais poços serem ativados, quando então a curva se desvia.

**Tabela 6.28 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO-2 Lourival na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra/BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	$\theta$	W $\theta$	$\eta$	r/B	D
PO-2 Lourival	1,25E-03	12000	0,03	30	0,36	-	0,1	1



**Figura 6.45: Avaliação dos parâmetros do condutor hidráulico no poço observado PO-2 Lourival, em regime influenciado na Fazenda Serrolândia usando o modelo de Barenblat *et al* 1960.**

**Tabela 6.29 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste do poço observado PO-2 Lourival na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.**

$T_f$ m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s
1,19E-03	1,91E-02	1,142	1,05E-06

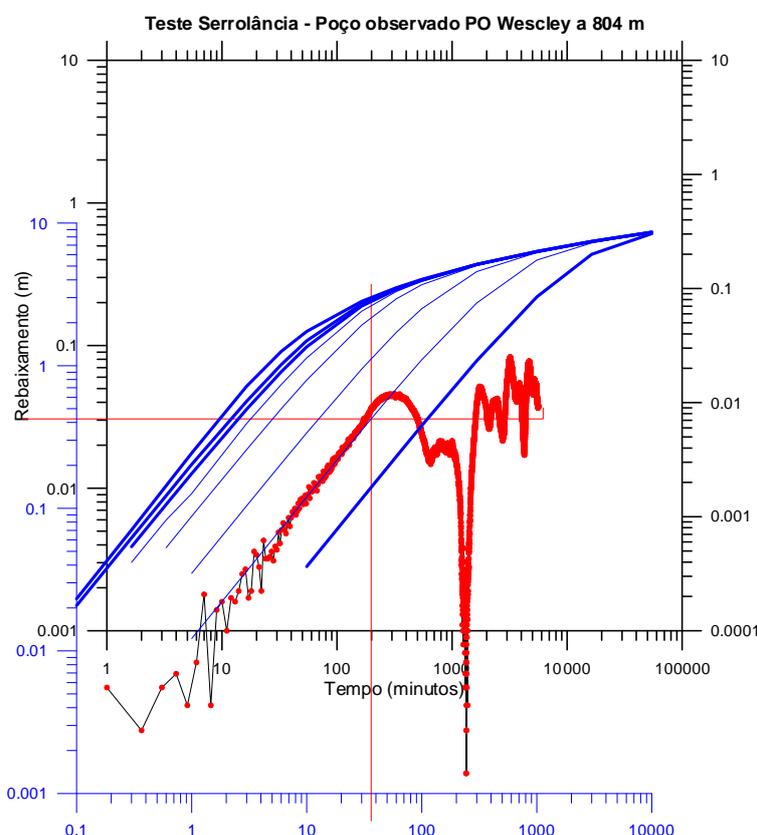
\* $T_f$  = transmissividade das fraturas; Sf = coeficiente de armazenamento das fraturas; a = abertura média das fraturas; Kf = condutividade hidráulica das fraturas.

- **Poço observado PO-3 a 804 m de distância na Fazenda Serrolândia**

A superposição da curva de rebaixamento obtida no poço PO-3 Wesley na Fazenda Serrolândia com a curva da função de Barenblat para meio fraturado (Figura 6.46), permitiu obter os parâmetros indicados na Tabela 6.30, a partir dos quais foram avaliados os parâmetros hidrodinâmicos mostrados na Tabela 6.31. Notar que na curva da Figura 6.50, durante um bom tempo a curva de campo se ajusta perfeitamente à função de Barenblat para  $r/B = 0,1$  refletindo o comportamento do condutor hidráulico antes dos demais poços serem ativados, quando então a curva se desvia.

**Tabela 6.30 – Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço PO-1 observado na Fazenda Serrolândia município de Presidente Dutra - BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	$\frac{W}{u}$	$\frac{W}{u}$	$\frac{W}{u}$	r/B	D
<b>PO-3 Wesley</b>	1,25E-03	12000	0,038	38	0,42	-	0,1	1



**Figura 6.46: Parâmetros da função de Barenblat obtidos na superposição com a curva de rebaixamento do poço observado PO-3 Wesley na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra/BA.**

**Tabela 6.31 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos no poço observado PO-3 Wesley na Fazenda Serrolândia, município de Presidente Dutra – BA.**

Teste	Q m <sup>3</sup> /s	t seg	s (m)	$\frac{W}{a}$	$\frac{W}{a}$	r/B	D	
<b>PO-3 Wesley</b>	1,25E-03	12000	0,038	38	0,42	-	0,1	1

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

### 6.1.6 Síntese dos parâmetros hidrodinâmicos da Bacia do Riacho do Juá

Os parâmetros hidrodinâmicos dos condutores hidráulicos analisados no Sistema Aquífero Bambuí (SAB) na área de Irecê estão resumidos na Tabela 6.32 e são analisados como segue:

No que se refere ao armazenamento nas fraturas, o parâmetro Sf reflete a extrema heterogeneidade do meio cárstico fraturado, pois indica uma variação da ordem de 35.000 vezes ( $2,3 \times 10^{-6} \leq Sf \leq 8,1 \times 10^{-2}$ ), consistente com a realidade do meio cárstico, sendo o valor médio encontrado para esse parâmetro igual a 1,2%. A condutividade hidráulica nas fraturas é baixa (média de 0,158 m/dia), estando cerca de 10 vezes acima da maioria dos valores encontrados na literatura, assim como a abertura média nas fraturas, que é de 1,25 mm, quando geralmente esse valor é inferior a 1 mm. Embora os testes tenham sido realizados em condições muito difíceis de interpretar, do ponto de vista prático pode-se dizer que os parâmetros hidrodinâmicos avaliados são representativos dos condutores hidráulicos testados.

**Tabela 6.32 – Parâmetros hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Bambuí (SAB) obtidos em 5 (cinco) testes de bombeamento realizados em condutores hidráulicos na área de Irecê-BA.**

Teste	Tf m <sup>2</sup> /s	Sf	a (mm)	Kf m/s	Kf (m/dia)
1	5,01E-03	2,93E-02	1,842	2,72E-06	0,2352
	3,48E-02	4,13E-04	3,512	9,91E-06	0,8565
	8,36E-03	1,23E-04	2,184	3,83E-06	0,3306
	1,63E-03	2,41E-05	1,267	1,29E-06	0,1111
2	2,21E-03	9,56E-04	1,403	1,58E-06	0,1363
	7,90E-04	2,31E-06	0,996	7,94E-07	0,0686
	8,11E-03	9,21E-06	2,162	3,75E-06	0,3242
3	5,07E-05	2,19E-02	0,399	1,27E-07	0,011
	1,99E-05	8,12E-03	0,292	6,81E-08	0,0059
4	4,68E-05	3,63E-04	0,389	1,21E-07	0,0104
	4,54E-05	4,54E-06	0,385	1,18E-07	0,0102
5	6,22E-04	8,06E-02	0,919	6,76E-07	0,0584
	3,88E-04	7,76E-03	0,786	4,94E-07	0,0427
	1,19E-03	1,91E-02	1,142	1,05E-06	0,0903
	1,10E-03	1,39E-02	1,111	9,89E-07	0,0855
Médias	<b>4,29E-03</b>	<b>1,22E-02</b>	<b>1,253</b>	<b>1,83E-06</b>	<b>1,58E-01</b>

## 6.2 Recargas e exutórios

O cômputo das recargas médias anuais referentes à área piloto da Bacia do Riacho do Juá foi balizado, em parte, através dos dados hidrológicos obtidos junto à estação fluviométrica Rio Verde II<sup>7</sup>. Ao todo foram elaborados 21 hidrogramas anuais os quais possibilitaram analisar os deflúvios totais médios diários, além das parcelas relativas aos aportes subterrâneos.

A área piloto da Bacia do Riacho do Juá, situada na porção centro-norte do estado da Bahia, representa aproximadamente 16% da bacia de contribuição vinculada à estação Rio Verde II. A Figura 6.47 mostra a localização da área piloto e da bacia de contribuição que converge para a estação Rio Verde II.

Cumprе ressaltar que a ausência de estações fluviométricas localizadas em seções favoráveis ao melhor conhecimento da dinâmica hídrica regional (superficial e subterrânea), contribuiu para a adoção da estação citada acima, cuja área de contribuição (7007 km<sup>2</sup>) em muito extrapola o domínio de interesse de estudo da área Piloto do Riacho do Juá.

Regiões cársticas frequentemente apresentam terrenos despídos de redes de drenagem superficial, o que revela a natureza de dissolução dos carbonatos e o desenvolvimento de uma rede subterrânea mais expressiva.

<sup>7</sup> Código ANA 47249000

Conforme citado por Villanueva *et al* (2014), a região de Irecê conta com a ocorrência de estruturas cársticas condicionadas por sistemas de fraturamentos muito evidentes, propiciando elevado potencial de vulnerabilidade intrínseca ao aquífero local.

As atividades agrícolas na microrregião de Irecê têm intensificado a utilização de técnicas de irrigação apoiadas na perfuração de poços tubulares (Silva, 2005), o que tem contribuído para o rebaixamento do nível d'água dos aquíferos de modo a comprometer as disponibilidades hídricas dos reservatórios subterrâneos.

O conhecimento acerca das peculiaridades hidrológicas do carste tem aumentado não somente em função do reservatório subterrâneo que se destaca na maioria das regiões de ocorrência das rochas carbonáticas, como também graças à sua fragilidade e aos diversos problemas de ordem ambiental (Santos *et al*, 2010).

O domínio representado pela bacia de contribuição hidrográfica do Rio Verde II apresenta quase 50% de sua área coberta por rochas carbonáticas da Formação Salitre. Os demais tipos de rocha são representados por rochas metapelíticas, arenitos, conglomerados e diamictitos, sendo apenas uma pequena porção constituída por rochas cristalinas e coberturas detrito lateríticas.

Mesmo se tratando de um ambiente onde os fatores geológicos propiciam a existência de atributos fortemente favoráveis à conformação de aquíferos bem desenvolvidos, são as questões climáticas locais as que regulam o potencial de recarga.

Como será visto adiante, os elevados índices de evapotranspiração e as baixas precipitações pluviométricas médias anuais, condicionam a região a períodos de estiagens prolongadas, tendo sido por diversos estudiosos da área agrônoma, considerada pouco favorável ao desenvolvimento de cultivos dependentes das águas de chuva. Como o objetivo do estudo é o de se avaliar as recargas do domínio compreendido pela área piloto da Bacia do Riacho do Juá, as análises regionais da Bacia Rio Verde II deverão possibilitar as extrapolações dos índices encontrados para a porção de interesse.

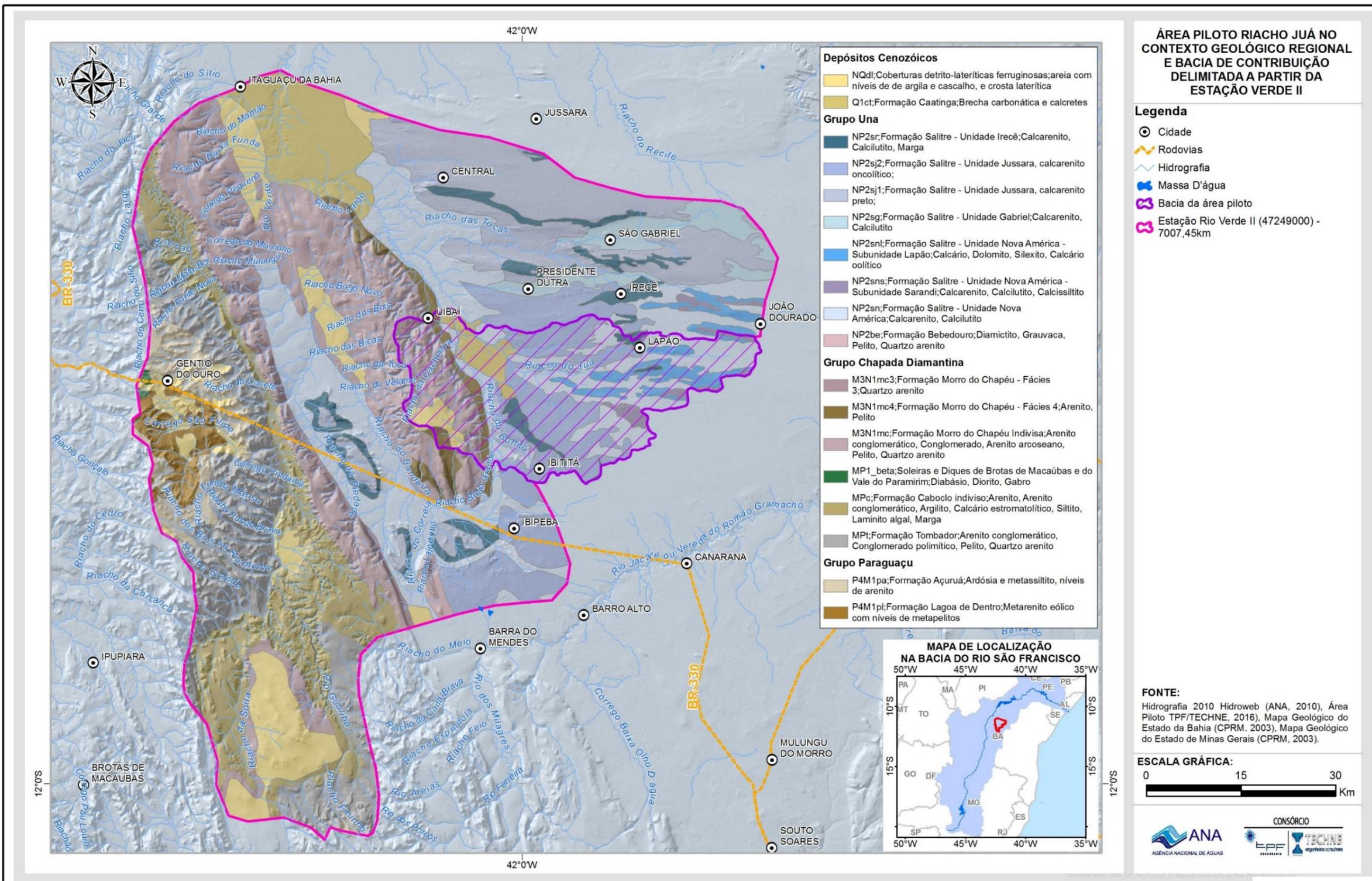


Figura 6.47: Mapa de localização da Área Piloto Riacho do Juá no contexto geológico regional e bacia de contribuição delimitada a partir da estação Rio Verde II

A Tabela 6.33 a seguir exhibe os dados básicos de Rio Verde II, posto fluviométrico utilizado para os cálculos de recarga, sendo apresentadas conjuntamente informações como dimensão da bacia, código e nome da estação bem como o período a que se referem os registros de medições de descarga em cada uma delas.

**Tabela 6.33 – Informações básicas sobre a estação fluviométrica utilizada no cálculo de recarga da Área Piloto de Riacho do Juá.**

Código*	X	Y	Nome	Curso d'água	Área (Km <sup>2</sup> )	Período	Adotado para cálculo
47249000	-10.9864	-42.3422	Rio Verde II	Rio Verde	7.007,45	1977-2015	1977 – 2007

\*Obs.: código adotado pela Agência Nacional de Águas – ANA

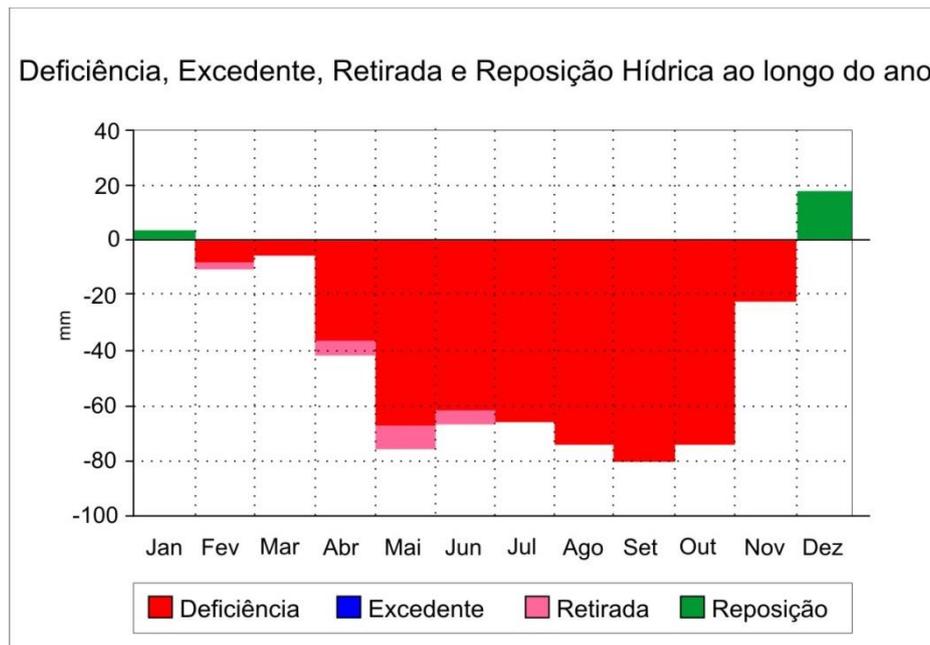
### 6.2.1 Considerações hidrogeológicas e hidrológicas

Localizada no domínio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré, a área piloto da Bacia do Riacho do Juá situa-se numa porção reconhecida por sua potencialidade agrícola, onde a agricultura - através da irrigação – deve influenciar fortemente a disponibilidade hídrica dos reservatórios de água subterrânea.

Em estudo realizado na região de Irecê, Villanueva *et al* (2015) observaram que o déficit hídrico é percebido em todos os meses do ano, sendo os valores médios de precipitação notadamente baixos (653,40 mm/ano) e a taxa de evapotranspiração potencial bem elevada (1.147 mm/ano). A partir do balanço hídrico realizado por estes autores, nota-se que nos meses de dezembro e janeiro, períodos cujos índices pluviométricos são mais elevados, ocorre certa reposição de água no aquífero, entretanto as chuvas subsequentes não são suficientes para manter a geração de excedentes hídricos (Figura 6.48).

Além disso, os componentes do balanço hídrico apresentados pela Embrapa (2003) para a estação climatológica de Irecê, período de 1961 a 1990, revelam que a Evapotranspiração Real totaliza 653 mm, o que significa, em termos médios, não haver realmente excedente hídrico e, por consequência, a ausência de recarga.

Assim, dado seu caráter físico-climático eminentemente semiárido (Figura 6.49), esta região apresenta um regime marcado por chuvas irregulares e períodos de secas prolongadas, sendo, portanto, a demanda por água algo crescente no local, especialmente pela atividade agrícola.



**Figura 6.48: Deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica do município de Irecê (período 1961-1990), Embrapa (2003).**

Desse modo, as possibilidades de ocorrência de excedente hídrico restringem-se apenas a episódios plurianuais onde, em alguns meses na estação úmida, pode haver aportes de chuva formando recargas esporádicas. Isto irá se refletir em um ambiente extremamente frágil, onde os volumes de recarga são limitados pela natureza climática e sua distribuição regional, independentemente do potencial dos aquíferos cársticos.

A abordagem dessas questões deverá exigir procedimentos de gestão bem mais rigorosos, onde é vital a disponibilidade de uma rede de monitoramento espacialmente planejada, tanto do ponto de vista hidrológico quanto do ponto de vista hidrogeológico, salientando-se naturalmente a necessidade de implantação de um forte controle do uso da água subterrânea, da perfuração de novos poços tubulares e do inventário de uso atual das águas subterrâneas.

No âmbito desse contexto, diversos estudos sobre a intensa utilização da água subterrânea nas regiões de Lapão e Irecê têm sido desenvolvidos nos últimos anos. Esses estudos contemplam a hipótese de que a exploração de água subterrânea pode estar agravando os já severos rebaixamentos de nível decorrentes da estiagem iniciada em 2010, além de contribuir à intensificação do processo de abatimento dos terrenos (Silva, 2005; ANA, 2006; Nossa, 2011).

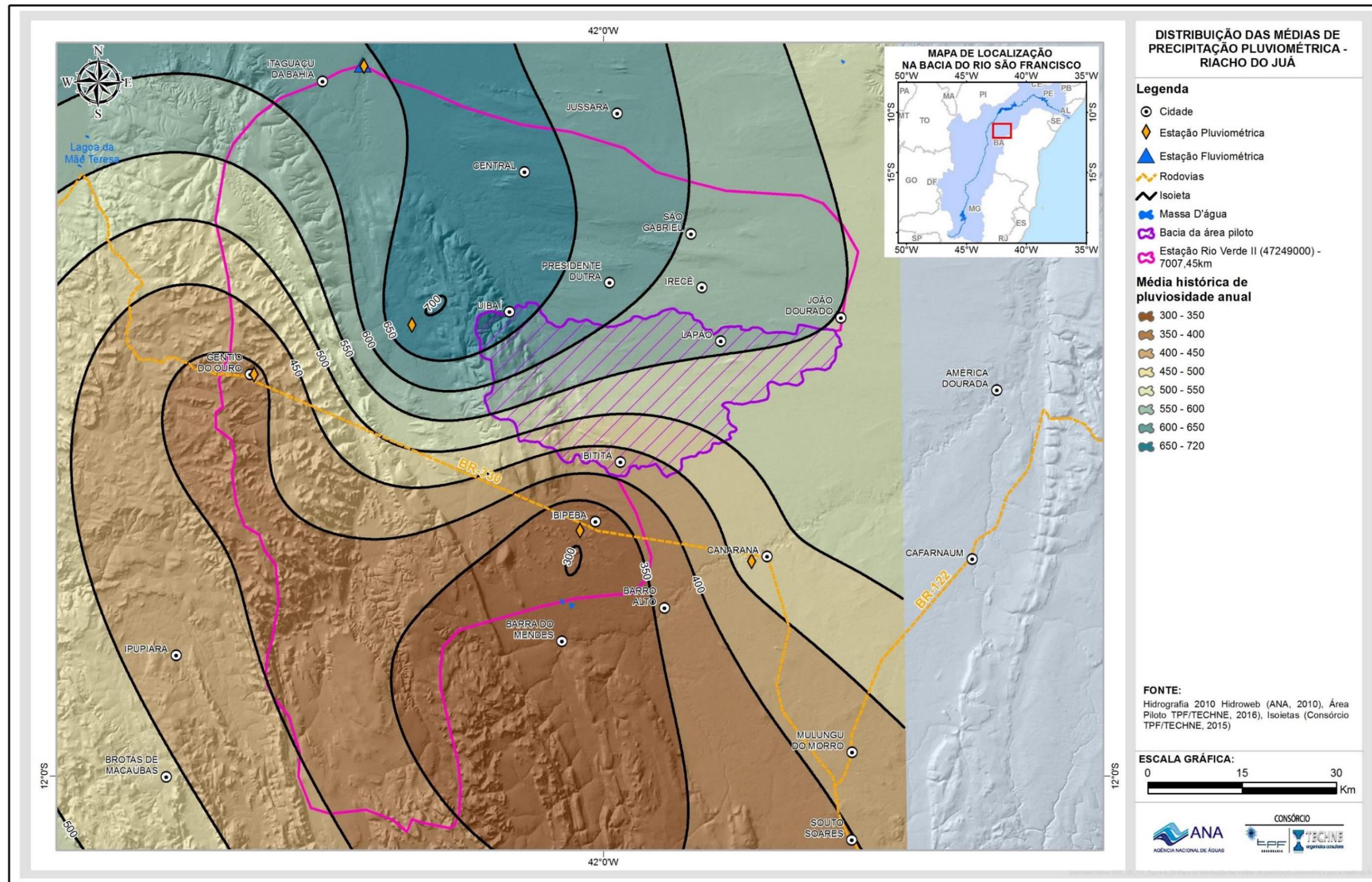


Figura 6.49: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da Área Piloto Riacho do Juá e bacia de contribuição da estação fluviométrica Rio Verde II.

## 6.2.2 Procedimentos metodológicos de estudo

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. A identificação e a individualização destas parcelas possibilitam estimar a recarga média dos aquíferos sob a perspectiva regional.

Neste estudo, os procedimentos de separação de escoamento 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 do Riacho do Juá basearam-se nas respostas hidrológicas obtidas a partir de 21 hidrogramas (1977-2007) anuais para a estação Rio Verde II8.

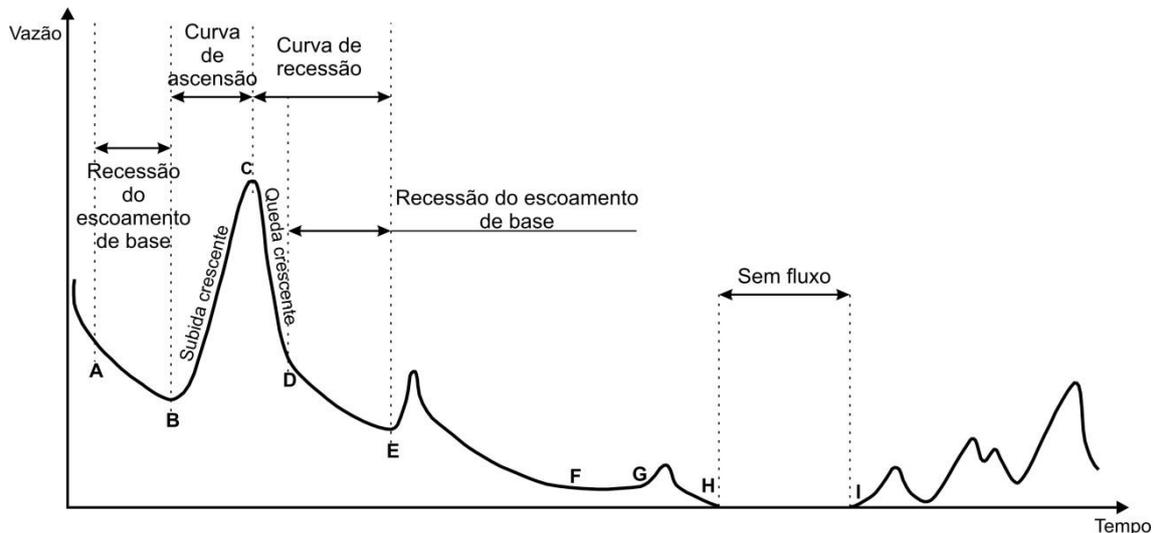
Pela representação gráfica da vazão em uma dada unidade de tempo, o hidrograma reflete integralmente as características climáticas, fisiográficas e de ocupação humana em uma bacia hidrográfica, atuando como uma espécie de resposta desta, à pluviosidade.

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 d'água (Figura 6.50).

Conforme pode ser visualizado abaixo, 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 d'água intermitentes, podem ser verificados ainda trechos cujo fluxo é igual à zero (de H até I).

---

<sup>8</sup> Em função da ausência de dados de vazão em alguns dias ao longo do período de monitoramento supracitado, determinados anos não foram utilizados para os cálculos relacionados ao fluxo subterrâneo.



**Figura 6.50: Hidrograma e suas regiões principais. Adaptado de: Aksoy et al/ 2014.**

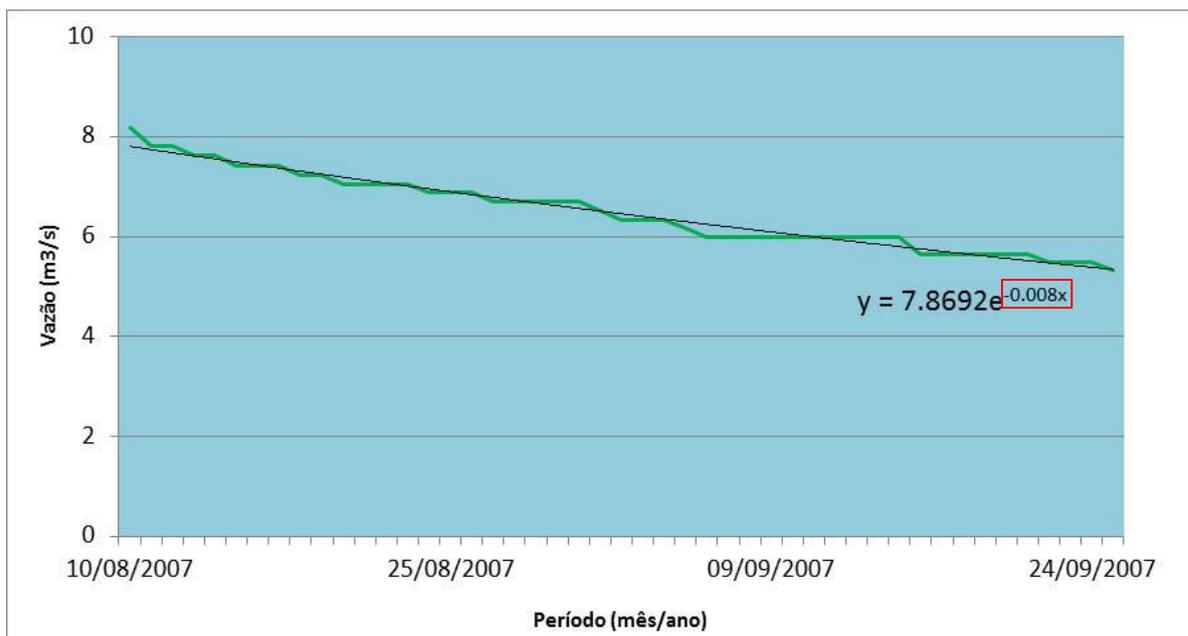
Ressalta-se que após um evento de chuva, a parte decrescente de um hidrograma (recessão) figura como um reflexo da diminuição do nível da água no aquífero (ou nos aquíferos) de determinada bacia ao longo do tempo. De modo geral, o momento a partir do qual a vazão de um curso d'água tem origem exclusivamente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

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

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 (em unidade de tempo) (Collischonn, 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 6.51 a seguir.



**Figura 6.51: Valor de  $\frac{-1}{k}$  (retângulo vermelho) a partir da curva exponencial referente ao período de recessão.**

Em um dado hidrograma, filtros numéricos permitem separar, de modo aproximado, suas componentes superficial e subterrânea. 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 que  $k$  é a constante e  $\Delta t$  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<sup>9</sup> baseado em dois parâmetros (“BFI<sub>max</sub>” e “a”):

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

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

BFI<sub>max</sub> 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<sub>max</sub> 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.

Na Tabela 5.34 a seguir são indicados os percentuais de distribuição de cada uma das tipologias litológicas existentes, considerando-se a bacia de contribuição Rio Verde II para os cálculos de recarga.

No item seguinte, relativo aos resultados da estação/bacia Rio Verde II, estão indicados cada um dos valores de recarga e demais parâmetros de interesse encontrados para os tipos litológicos, conforme apresentado nas Tabelas 6.35 e 6.36.

### 6.2.3 Resultados de quantificação de recarga

A partir da análise dos hidrogramas da estação Rio Verde II, os quantitativos referentes às descargas subterrâneas foram levantados para cada tipologia litológica, bem como os valores médios de recarga anual e seus respectivos percentuais, quando considerada a média pluviométrica registrada pelas isoietas das 8 estações analisadas dentro e no entorno da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

Os hidrogramas da estação de interesse, os quais serviram para caracterizar os volumes médios que representam as descargas oriundas dos aquíferos, estão apresentados no ANEXO 3.3. Nestes hidrogramas podem ser visualizados os traçados que representam os filtros adotados nos procedimentos e que serviram para identificar os volumes médios de referência (Filtro B) considerados como o valor de base assumido para o escoamento subterrâneo (recarga), considerando-se todo o período de medição de descargas da estação analisada. Nesses hidrogramas podem ser observados ainda, os valores de precipitação da estação pluviométrica associada.

---

<sup>9</sup> Denominado Filtro B neste estudo

**Tabela 6.34 – Percentuais de distribuição das litologias na bacia hidrográfica delimitada a partir da estação Rio Verde II.**

GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA ESTAÇÃO RIO VERDE II			
Unidade Geológica	Área (km <sup>2</sup> )	%	Tipologia Litológica
<b>Açuruá</b>	203,22	2,90	Metasiltito, ardósia, conglomerado, folhelho, siltito, metarenito
<b>Bebedouro</b>	19,57	0,28	Diamictito, arenito, grauvaca, rocha pelítica
<b>Caatinga</b>	288,58	4,19	Brecha carbonática
<b>Caboclo Indivisa</b>	717,12	10,23	Argilito, arenito, siltito, calcário estromatolítico, arenito conglomerático, marga
<b>Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas</b>	506,07	7,22	Aglomerado, laterita, depósitos de areia, depósitos de argila
<b>Gabriel</b>	175,73	2,51	Calcilito, calcarenito
<b>Irecê</b>	217,07	3,10	Calcilito, calcarenito, marga
<b>Jussara Médio e Inferior</b>	717,95	10,24	Calcilito, calcarenito, siltito, calcissiltito, arcóseo
<b>Jussara Superior</b>	362,39	8,94	Calcirrudito, calcilito, calcarenito
<b>Lagoa de Dentro</b>	116,84	1,67	Rocha metapelítica, arenito
<b>Morro do Chapéu – fácies 3</b>	47,14	0,67	Arenito
<b>Morro do Chapéu – fácies 4</b>	145,51	2,08	Rocha pelítica, arenito
<b>Morro do Chapéu Indivisa</b>	1.170,28	16,70	Arenito, rocha pelítica, arenito arcoseano, arenito conglomerático, conglomerado
<b>Nova América</b>	1.169,90	16,69	Calcilito, calcarenito
<b>Nova América – Subunidade Lapão</b>	126,21	1,80	Calcário, calcarenito oolítico, dolomito, sillexito
<b>Nova América – Subunidade Sarandi</b>	38,66	0,55	Calcilito, calcarenito, calcissiltito
<b>Soleiras e Diques de Broas de Macaúbas e do Vale do Paramirim</b>	5,36	0,08	Diorito, gabro, diabásio
<b>Tombador Indivisa</b>	715,75	10,21	Rocha pelítica, arenito, arenito conglomerático, conglomerado polimítico
<b>Total</b>	<b>7.007,45</b>	<b>100,00</b>	

Já o hidrograma representativo da bacia definida a partir da estação Rio Verde II<sup>10</sup> pode ser visualizado a seguir, através da Figura 6.52.

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 liberado 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 se inicia o processo de seleção do melhor valor que se ajusta à recarga do domínio hidrográfico de interesse.

Perante as separações do escoamento superficial e subterrâneo obtidas através dos hidrogramas, verificou-se que a vazão específica ponderada pelas tipologias litológicas presentes no domínio da bacia do rio Verde II se apresenta muito baixa, coerentemente ao observado pelos dados do balanço hídrico apresentado por Embrapa (2003), onde os excedentes hídricos são baixos ou inexistentes.

O valor médio de descarga subterrânea específica encontrado a partir da separação dos escoamentos de base e superficial, de acordo com as análises dos hidrogramas apresentados para a estação de rio Verde II, é de 0,18 L/s.km<sup>2</sup>.

---

<sup>10</sup> Trata-se aqui do rio Verde baiano que contorna o Platô de Irecê pelo seu lado ocidental, mal cortando as regiões marginais da bacia calcária e fluindo predominantemente sobre rochas do Grupo Chapada Diamantina. Despeja no lago de Sobradinho.

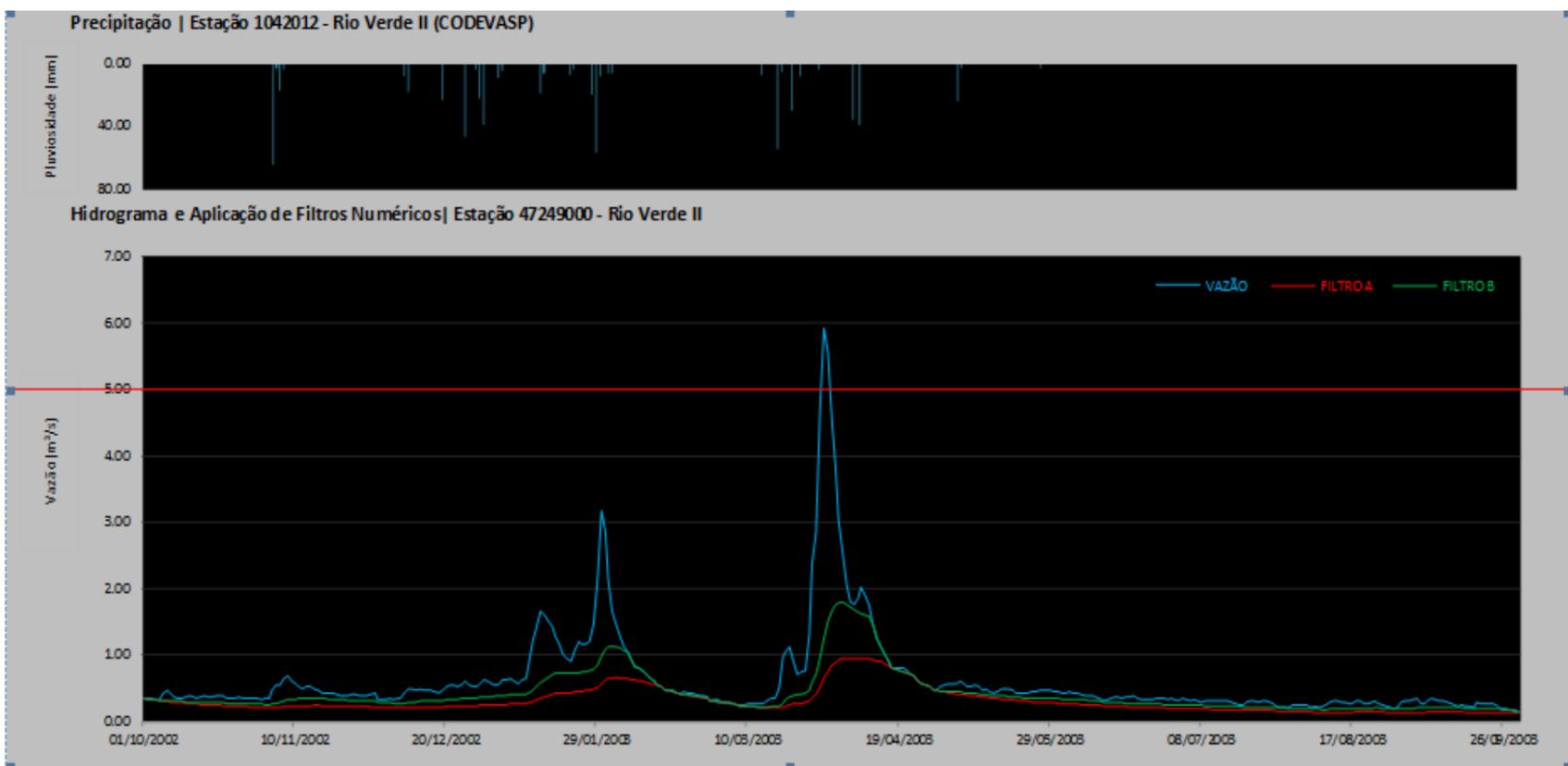
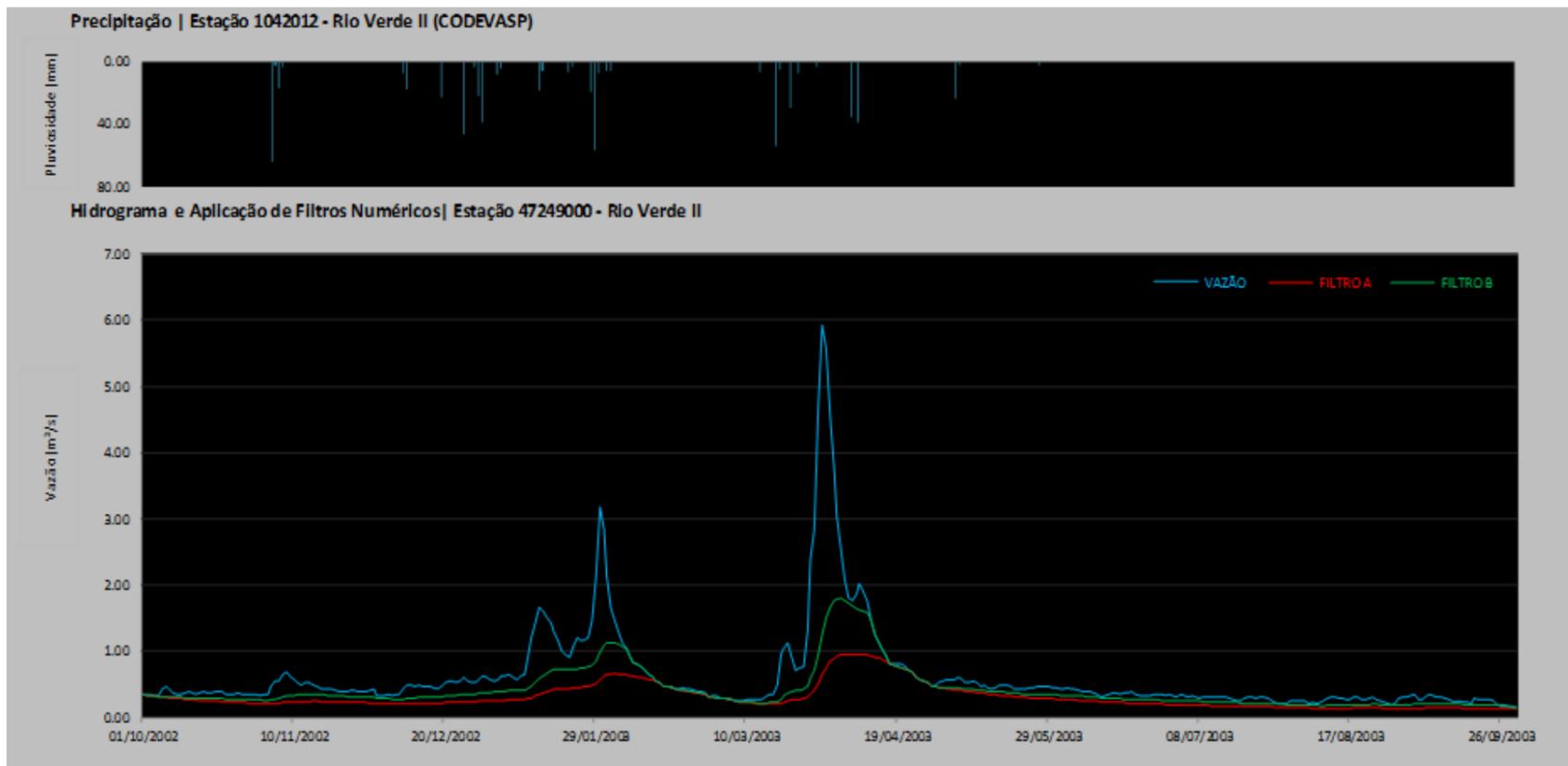


Figura 6.52: Hidrograma representativo da Estação Fluviométrica Rio Verde II (Código ANA 47249000) e pluviosidade da estação Pluviométrica Rio Verde II CODEVASP (Código ANA 1042012), no ano hidrológico 2002-2003.

### 6.2.3.1 Estação Rio Verde II

Como observado no hidrograma da Figura 6.52 acima, e também nos demais hidrogramas constantes no ANEXO 3.3, o valor médio das descargas totais anuais equivale a 2.155 L/s. A Tabela 6.35 apresentada abaixo mostra esses valores, a partir dos quais se verifica que mesmo a média do total das descargas para a área de contribuição de 7.007 km<sup>2</sup> é muito pouco expressiva, representando apenas 0,31 L/s.km<sup>2</sup>.

**Tabela 6.35 – Valores de Descarga Total Média Anual (Estação Rio Verde II).**

Ano hidrológico	Descarga Total (m <sup>3</sup> /s)	Descarga de base (m <sup>3</sup> /s)
1978-1979	7,630	4,94
1979-1980	8,112	4,32
1980-1981	6,015	2,97
1981-1982	1,499	0,91
1982-1983	1,853	1,10
1983-1984	0,833	0,48
1984-1985	0,925	0,64
1985-1986	0,955	0,68
1986-1987	0,543	0,34
1987-1988	0,832	0,58
1989-1990	5,611	3,07
1990-1991	1,402	0,98
1993-1994	0,706	0,50
1997-1998	0,814	0,50
1999-2000	1,024	0,77
2000-2001	3,498	1,53
2001-2002	0,770	0,64
2002-2003	0,614	0,41
2003-2004	1,924	1,09
2004-2005	0,521	0,34
2005-2006	0,698	0,42
2006-2007	0,633	0,43

Na Tabela 6.36, são expostos os valores resultantes das análises realizadas para esta bacia, cujos cálculos levam em consideração uma área que totaliza 7.007 km<sup>2</sup> relativa à Bacia do Rio Verde II e 965 km<sup>2</sup> para a área piloto.

**Tabela 6.36 – Resultados dos valores de recarga para a bacia hidrográfica conformada pela Estação Rio Verde II ( $R_e$  = recarga específica média; R = recarga média; Nef = porosidade efetiva equivalente).**

VALORES DE RECARGA PARA A BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DO RIO VERDE – ESTAÇÃO RIO VERDE II				$R_e$ (L/s.km <sup>2</sup> )	R (L/s)	Nef (%)
Unidade Geológica	Área (km <sup>2</sup> )	%	Tipologia Litológica			
Açuruá	203,22	2,90	Metasiltito, Ardósia, Conglomerado, Folhelho, Siltito	0,05	10,33	0,025
Bebedouro	19,57	0,28	Diamictito, Arenito, Grauvaca	0,24	4,77	0,120
Caatinga	288,58	4,12	Brecha carbonática	0,15	44,00	0,075
Caboclo Indivisa	717,12	10,23	Argilito, Arenito, Siltito, Lamito, Calcário	0,13	94,75	0,065
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	506,07	7,22	Aglomerado, Laterita, Depósitos de areia	0,30	154,31	0,150
Gabriel	175,73	2,51	Calculutito, Calcarenito	0,18	32,15	0,090
Irecê	217,07	3,10	Calculutito, Calcarenito, Marga	0,14	30,89	0,070
Jussara Médio e Inferior	717,95	10,25	Calculutito, Calcarenito, Siltito, Calcissiltito	0,12	87,57	0,060
Jussara Superior	626,49	8,94	Calcirrudito, Calculutito, Calcarenito	0,18	114,62	0,090
Lagoa de Dentro	116,84	1,67	Rocha metapelítica, Metarenito	0,27	32,06	0,135
Morro do Chapéu - fácies 3	47,14	0,67	Arenito	0,25	11,98	0,125
Morro do Chapéu - fácies 4	145,51	2,08	Rocha pelítica, Arenito	0,15	22,18	0,075
Morro do Chapéu Indivisa	1170,28	16,70	Arenito, Rocha pelítica, Arenito arcoseano, Arenito conglomerático, Conglomerado	0,22	261,68	0,110
Nova América	1169,90	16,70	Calculutito, Calcarenito	0,18	214,03	0,090
Nova América - Subunidade Lapão	126,21	1,80	Calcário, Calcarenito oolítico, Dolomito	0,11	14,11	0,055
Nova América - Subunidade Sarandi	38,66	0,55	Calculutito, Calcarenito, Calcissiltito	0,20	7,86	0,100
Soleiras e Diques	5,36	0,08	Diorito, Gabro, Diabásio	0,07	0,38	0,035
Tombador Indivisa	715,75	10,21	Rocha pelítica, Arenito, Arenito conglomerático	0,17	123,67	0,085

## 6.2.4 Considerações finais

O somatório dos valores “volume médio de recarga” para cada litologia apresentada na Tabela 6.36 para a bacia do rio Verde II equivale a 1.261 L/s. Ponderando esse valor pela área da bacia (7007 Km<sup>2</sup>), têm-se uma recarga média de 0,18 L/s.km<sup>2</sup>. Em termos médios anuais, portanto, a recarga na bacia do rio Verde II corresponde a 3,98 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/ano ou 5,7 mm/ano, o que equivale a 0,89% da precipitação média local, considerando-se o valor de 638 mm/ano.

A área piloto da Bacia do Riacho do Juá tem área correspondente a 965 km<sup>2</sup>. Utilizando o valor médio da descarga específica adotada para o Rio Verde II (valor de 0,18 L/s.km<sup>2</sup>) e a área da bacia do Riacho do Juá, obtêm-se para essa bacia o valor de 174 L/s como recarga total. Na Tabela 6.37, a seguir, estão indicados os valores de descarga subterrânea média por litologia, que foram obtidos utilizando o valor de 174 L/s (recarga total) ponderados pela porosidade efetiva média estimada para cada uma das litologias.

**Tabela 6.37 – Resultados de recarga encontrados para a área piloto da Bacia do Riacho do Juá (R<sub>e</sub> = recarga específica média; R = recarga média; Nef = porosidade efetiva equivalente).**

Unidade Geológica	Área (km <sup>2</sup> )	%	R <sub>e</sub> (L/s.km <sup>2</sup> )	R (L/s)	Nef (%)
<b>Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas</b>	335,00	34,70	0,26	86,77	0,150
<b>Irecê</b>	30,20	3,13	0,12	3,65	0,070
<b>Jussara Superior</b>	27,55	2,85	0,16	4,28	0,090
<b>Morro do Chapéu - fácies 4</b>	291,65	30,21	0,13	37,77	0,075
<b>Morro do Chapéu Indivisa</b>	63,90	6,62	0,19	12,14	0,110
<b>Nova América</b>	108,70	11,26	0,16	16,89	0,090
<b>Nova América - Subunidade Lapão</b>	83,05	8,60	0,09	7,89	0,055
<b>Nova América - Subunidade Sarandi</b>	25,32	2,62	0,17	4,37	0,100
<b>Totais</b>	965,39	100		173,77	

Estes resultados mostram que a recarga média anual para a área piloto Bacia do Riacho do Juá corresponde a 5,48 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano, cerca de 625 m<sup>3</sup>/h. Nesse caso, como a precipitação média na Bacia do Rio Verde II e na Bacia Riacho do Juá são equivalentes (média utilizada de 638 mm/ano), ao se tomar o valor de contribuição subterrânea por área encontrado para a Bacia do rio Verde II (valor de 0,18 L/s/km<sup>2</sup>) para os cálculos de recarga na Bacia do Riacho do Juá, evidentemente encontra-se a mesma taxa de recarga: 5,7 mm/ano, ou 0,89% da precipitação média local, considerando-se o valor de 638 mm/ano e a área de 965,39 km<sup>2</sup>.

Importante notar, como observado pela distribuição dos tipos litológicos presentes nesses domínios, que os carbonatos representam 79% das rochas contidas na área piloto, sendo que no domínio da bacia do Rio Verde II, esse percentual diminui para 48%. Esses aspectos evidenciam que os valores a serem adotados para cálculo das contribuições específicas oriundas da área

piloto da Bacia do Riacho do Juá podem ser refinados caso seja levada em conta a proporção em área das unidades aflorantes em cada domínio.

Dessa forma, observando as proporções relativas aos tipos litológicos em área nos dois domínios estudados pode-se estimar uma contribuição subterrânea proporcional por litologia. Ou seja, utilizando a vazão mínima ponderada por litologia na Bacia do rio Verde II, e o percentual de ocorrência dessa mesma litologia na bacia do Riacho do Juá calcula-se a vazão mínima ponderada por tipo de rocha na bacia do Riacho do Juá.

O resultado desses cálculos é apresentado na Tabela 6.38. Conforme os cálculos, a recarga total na área piloto corresponde a 226 L/s. Constata-se então que a área piloto deve contribuir com 18% da recarga dos aquíferos na bacia do Rio Verde II e das descargas de base medidas na referida seção fluviométrica.

**Tabela 6.38 – Proporções entre as áreas de ocorrência da área piloto do Riacho do Juá e a bacia do Rio Verde II.**

Tipos litológicos presentes na área Piloto do Riacho do Juá	Proporções das áreas de exposição entre Riacho do Juá e Bacia do rio Verde II	Vazão Mínima Ponderada por Tipologia (l/s)
Nova América	28,64%	61,29
Coberturas detrito-lateríticas ferruginosas	5,97%	9,21
Irecê	46,55%	14,38
Jussara Superior	43,92%	50,34
Morro do Chapéu - fácies 4	9,29%	2,06
Morro do Chapéu Indivisa	28,64%	74,93
Nova América - Subunidade Lapão	65,80%	9,29
Nova América - Subunidade Sarandi	65,51%	5,15
		226,64

Por fim, deve-se assumir que a recarga média anual a ser considerada para a área piloto do riacho do Juá deve ser de  $7,15 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, cerca de 816 m<sup>3</sup>/h (226,6 L/s) ou 7,4 mm/ano ou 7,15 hm<sup>3</sup>/ano, o que equivale a 1,16% da precipitação média local, sendo esta considerada como 638 mm/ano numa área de 965,39 km<sup>2</sup>.

### 6.3 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<sup>3</sup>), 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 ( $L^3 T^{-1}$ ), sendo considerados como recursos. Os recursos de água subterrânea são aqui designados de recarga e de reserva explorável.

### 6.3.1 Reservas permanentes

De acordo com a discussão apresentada no item 5.1 as dissoluções cársticas ocorrem predominantemente acima de 120 metros de profundidade. É, assim, escassa a probabilidade de sucesso de perfurações que, improdutivas até essa profundidade, sejam aprofundadas além. Como o nível estático médio é da ordem de 25 metros, considerar uma espessura saturada de 95 metros afigura-se como verossímil. Esta é a espessura saturada do aquífero cárstico desenvolvido na Formação Salitre, na área piloto do riacho do Juá. A área de afloramento deste aquífero, por sua vez, será considerada como 744,0 km<sup>2</sup> que é a área de ocorrência da Formação Salitre na bacia hidrográfica do riacho do Juá.

No que diz respeito à porosidade efetiva, foi adotado inicialmente o coeficiente de armazenamento das fraturas  $S_f$  determinado nos testes de aquífero pelo método fractal (ver item 6.4). Esse parâmetro, entretanto, é pontual, válido apenas nas cercanias imediatas do poço testado. Aplicando-se esse valor para toda a área de ocorrência do aquífero Salitre (744,0 km<sup>2</sup>), significa admitir que as características cársticas detectadas no local do teste prevalecem em toda a área de estudo, o que não é realista. Nessas condições foi julgado preferível adotar as porosidades efetivas que foram utilizadas na avaliação da contribuição dos diferentes aquíferos às descargas de base medidas nos hidrogramas. Em se tratando de aquíferos cársticos, essas porosidades não têm o sentido clássico da porosidade efetiva definida para meios porosos. Tratam-se antes, aqui, de porosidades efetivas equivalentes cujos valores numéricos resultaram, para as diferentes formações e diferentes bacias hidrográficas, de ajustes da recarga à descarga de base (ver item 5.5). Assim, no caso em análise, vamos considerar uma porosidade efetiva equivalente média de 0,09<sup>11</sup> para o aquífero cárstico aflorante desenvolvido na Formação Salitre.

A reserva permanente do Aquífero Salitre (RP) será dada, portanto, por: área de ocorrência (A) x espessura saturada (b) x porosidade efetiva equivalente ( $\mu_e$ )

- $RP = A \times b \times \mu_e = 744,0 \text{ km}^2 \times 0,095 \text{ km} \times 0,09 = 6,36 \text{ km}^3 \text{ ou } 6.360,0 \text{ hm}^3$

### 6.3.2 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.

---

<sup>11</sup> Média das unidades Irecê, Jussara Médio e Inferior, Jussara Superior e Nova América.

A recarga foi acima avaliada (item 6.5) a partir da análise de hidrogramas como sendo de  $7,15 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano ou 7,4 mm/ano ou 7,15 hm<sup>3</sup>/ano, o que equivale a 1,16% da precipitação média local, sendo esta considerada como 638 mm/ano numa área de 965,39 km<sup>2</sup>. Este será o valor considerado no presente relatório.

### **6.3.3 Exploração**

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

Uma análise bastante detalhada da produção dos poços da área piloto é apresentada no item 6.4. Os números obtidos nessa análise são aqui reproduzidos.

#### **6.3.4.1 Exploração efetiva**

A exploração efetiva é avaliada em 115,0 hm<sup>3</sup> em 2016 para regime de 8,5 horas/dia de bombeamento (ver item 6.4).

#### **6.3.4.2 Exploração instalada**

Considerando-se regime de bombeamento contínuo, chega-se a uma exploração instalada de 325,00 hm<sup>3</sup>/ano.

### **6.3.4 Síntese da Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos**

Os números obtidos no presente item 6.6 admitem os seguintes comentários:

- A reserva avaliada (6.360,00 hm<sup>3</sup>) parece assegurar a reserva explotável a longo prazo.
- A recarga (7,15 hm<sup>3</sup>/ano) é considerada realista, tendo sido avaliada a partir de séries históricas de descargas de base;
- A reserva explotável, avaliada em 2,14 hm<sup>3</sup>/ano, é muito baixa.
- A exploração efetiva estimada (115,00 hm<sup>3</sup>/ano) dá, teoricamente, uma ideia da exploração real ocorrendo na área. Este número, da forma como foi obtido (ver item 6.4) procurou levar em conta o imenso número de poços clandestinos existentes na área piloto em estudo. Ele ultrapassa significativamente a recarga (7,15 hm<sup>3</sup>/ano) e sua respectiva reserva explotável (2,14 hm<sup>3</sup>/ano), o que pode explicar parcialmente os rebaixamentos regionais excessivos dos níveis de bombeamento. Acredita-se, entretanto, que só uma programação de longo prazo, a ser conduzida pelo órgão gestor da Bahia, pode chegar a minimizar a distância entre as avaliações e a realidade;

- A exploração instalada (325,00 hm<sup>3</sup>/ano) representa a exploração máxima possível na área para a rede de poços que se acredita existir.

Na Tabela 6.39 são sintetizados as reservas e recursos de água subterrânea propostos para o aquífero Salitre na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

**Tabela 6.39 – Reservas e recursos hídricos subterrâneos na área piloto do riacho do Juá**

Reservas	Saturação (hm <sup>3</sup> )	6.360,00
		Sob Pressão (hm <sup>3</sup> )
Exploração	Efetiva (hm <sup>3</sup> /ano)	115,00
	Instalada (hm <sup>3</sup> /ano)	325,00
Recarga (hm <sup>3</sup> /ano)		7,15
Reserva Explotável (hm <sup>3</sup> /ano)		2,14

Os comentários acima deixam claro que os números apresentados nesta síntese da avaliação dos recursos hídricos subterrâneos devem ser encarados como referências iniciais para indicar os caminhos que devem ser tomados no início do processo de gestão. É necessário, com efeito, uma atuação técnica permanente do órgão gestor de recursos hídricos da Bahia, no sentido da obtenção de dados mais completos e mais precisos para que se possa, ao cabo de alguns poucos anos, se dizer alguma coisa mais concreta sobre a real situação da exploração na região de Irecê.

A recomendação acima é tanto mais justificada quando se sabe que estamos em presença de um reservatório cárstico extremamente heterogêneo onde a aleatoriedade é quase a regra geral e onde não se aplica o ferramental clássico da hidrologia subterrânea.

#### 6.4 Exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá

A situação da exploração de água subterrânea na área piloto da Bacia do Riacho do Juá é avaliada a partir das informações existentes sobre poços tubulares produtores. No presente tópico faz-se uma análise estatística dessas informações. O conjunto de poços inclui unidades levantadas pelo Consórcio e todas as outras obtidas de bancos preexistentes tais como Siagas e banco da CERB. Este conjunto serviu de base para análises mais detalhadas feitas em outros capítulos deste relatório, particularmente no que diz respeito à caracterização do regime de funcionamento dos poços, à estimativa da produção global de água, e ao estabelecimento de um balanço entre a oferta e retirada e elaboração de um mapa de zoneamento da exploração do aquífero (mapa de ZEAs).

A situação da exploração das águas subterrâneas do SAB na área piloto incluiu uma estatística descritiva dos dados de poços levantados e catalogados 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.

### 6.4.1 Tratamento Estatístico dos Dados de Poços

No presente tópico faz-se uma análise estatística do conjunto dos poços conhecidos na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. Esse conjunto inclui os poços levantados pelo Consórcio e todos os outros obtidos de bancos preexistentes tais como Siagas e banco da CERB. Esta análise serviu de base para análises mais detalhadas feitas em outros capítulos deste relatório, particularmente no que diz respeito à caracterização do regime de funcionamento dos poços, à estimativa da produção global de água, e ao estabelecimento de um balanço entre a oferta e retirada e elaboração de um mapa de zoneamento da exploração do aquífero.

Na Tabela 6.40 é apresentada a estatística descritiva dos valores numéricos de profundidade, diâmetro do revestimento, nível estático, nível dinâmico e vazão dos poços da área piloto considerados.

**Tabela 6.40 - Parâmetros estatísticos dos dados de poços da área piloto do Riacho do Juá.**

Parâmetros Estatísticos	Profundidade (m)	Diâmetro da boca (mm)	Nível Estático - NE (m)	Nível Dinâmico - ND (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
<b>Média</b>	95,3	152,9	17,3	39,4	13,0
<b>Mediana</b>	83,0	152,4	13,1	34,9	10,0
<b>Desvio Padrão</b>	35,0	10,3	13,6	25,5	11,5
<b>Coefficiente Variação</b>	0,4	0,1	0,8	0,6	0,9
<b>Valor máximo</b>	220,0	254,0	76,3	121,3	68,9
<b>Valor mínimo</b>	17,0	150,0	0,2	2,3	0,1
<b>Nº valores</b>	400	187	335	247	303

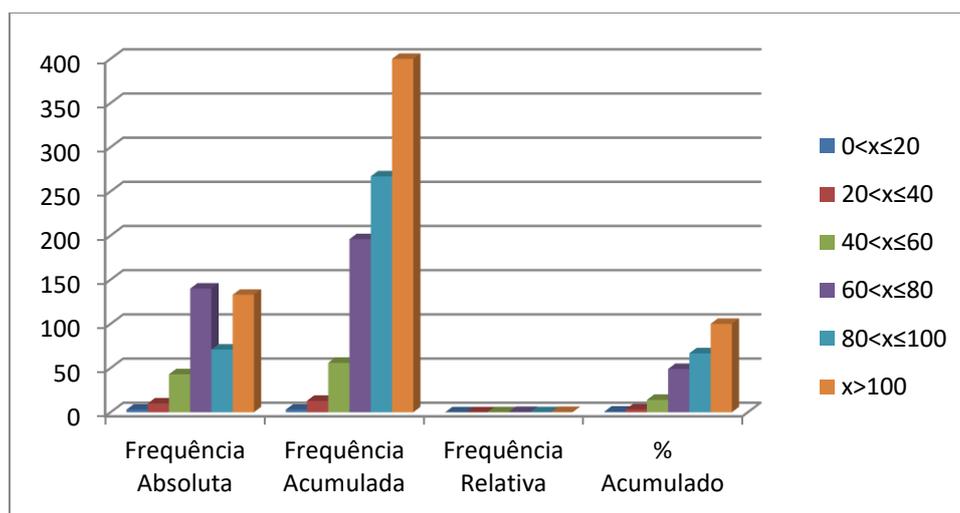
#### 6.4.1.1 Profundidade

A profundidade dos poços variou de 17 a 220 m. A profundidade média foi 95,3 m, o que se explica pelo fato de que as classes mais frequentes são aquelas de poços com profundidade superior aos 60 m, que somam 344 poços ou cerca de 86% do total. Já as classes compreendidas entre 0 e 60 m de profundidade possuem uma frequência muito baixa, com apenas 14%. A classe de menor frequência é a de 0 a 20 m, com menos de 1% do total e a segunda menos frequente é a de 20 a 40 m com ocorrência de apenas 10 poços. A Tabela 6.41 mostra que na classe de 60 a 80 m e na classe acima de 100 m é onde se encontra o maior número de poços. A primeira tem 140 poços (35%), enquanto que a segunda tem 133 poços (33%).

**Tabela 6.41 – Frequência da profundidade dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e dos novos cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Profundidade (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤20	3	3	0,01	0,75
20<x≤40	10	13	0,03	3,25
40<x≤60	43	56	0,11	14,00
60<x≤80	140	196	0,35	49,00
80<x≤100	71	267	0,18	66,75
x>100	133	400	0,33	100,00
<b>Total</b>	400			

A distribuição de frequência da profundidade dos pode ser visualizada no diagrama da Figura 6.53.



**Figura 6.53: Frequências das classes de profundidade dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

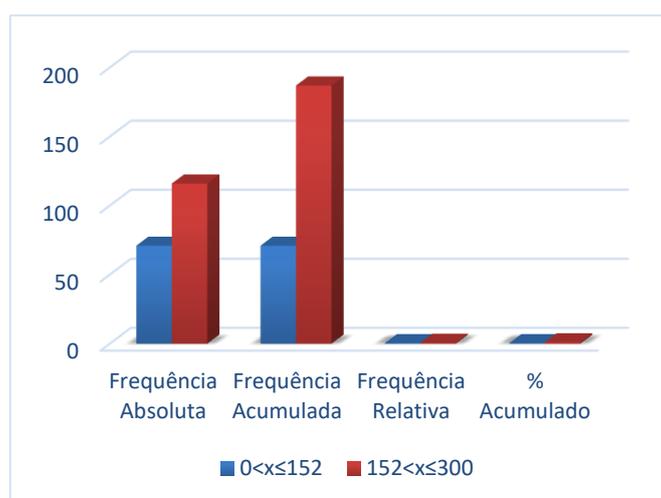
#### 6.4.1.2 Diâmetro da boca do poço

De acordo com a Tabela 6.42 e Figura 6.54, todos os 187 poços com informação apresentam diâmetro de revestimento até 300 mm. As classes, de 0 a 152 mm e de 152 a 300 mm, contêm, respectivamente, 38% e 62% do total.

A Figura 6.54 ilustra a distribuição de frequência do diâmetro da boca dos poços na Área Piloto do Riacho do Juá.

**Tabela 6.42 – Frequência dos diâmetros da Boca dos poços tubulares levantados no SIAGAS/CPRM, na CERB e dos novos cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Diâmetro da Boca do poço(mm)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
<b>0&lt;x≤152</b>	71	71	0,38	37,97
<b>152&lt;x≤300</b>	116	187	0,62	100,00
<b>Total</b>	187			



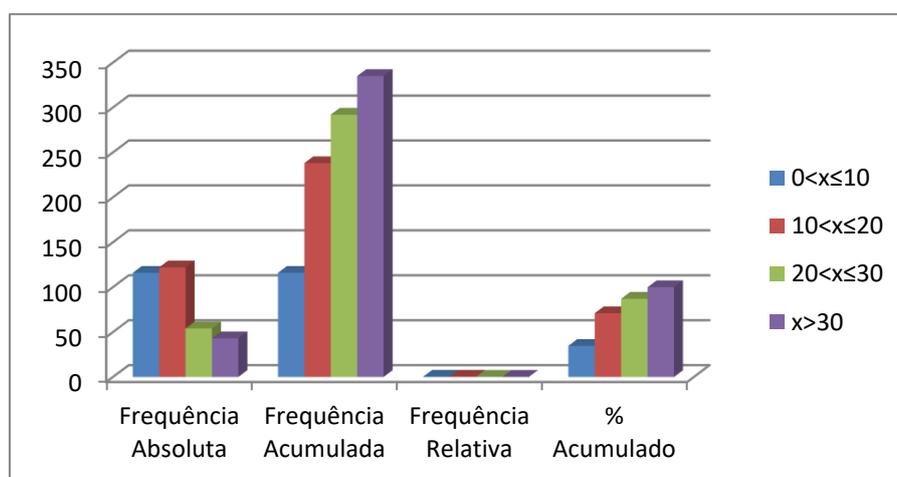
**Figura 6.54: Frequências das classes de diâmetro de revestimento dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

### 6.4.1.3 Nível Estático

De acordo com os dados da Tabela 6.43 e Figura 6.55, observa-se que aproximadamente 71% dos poços apresentam níveis estáticos rasos, até 20 m. Nas classes de 20 a 30 m encontram-se cerca de 16% dos poços e na classe de diâmetros acima de 30 m estão 13% 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 6.43 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis estáticos dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Nível Estático (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤10	116	116	0,35	34,63
10<x≤20	122	238	0,36	71,04
20<x≤30	54	292	0,16	87,16
x>30	43	335	0,13	100,00
<b>Total</b>	<b>335</b>			



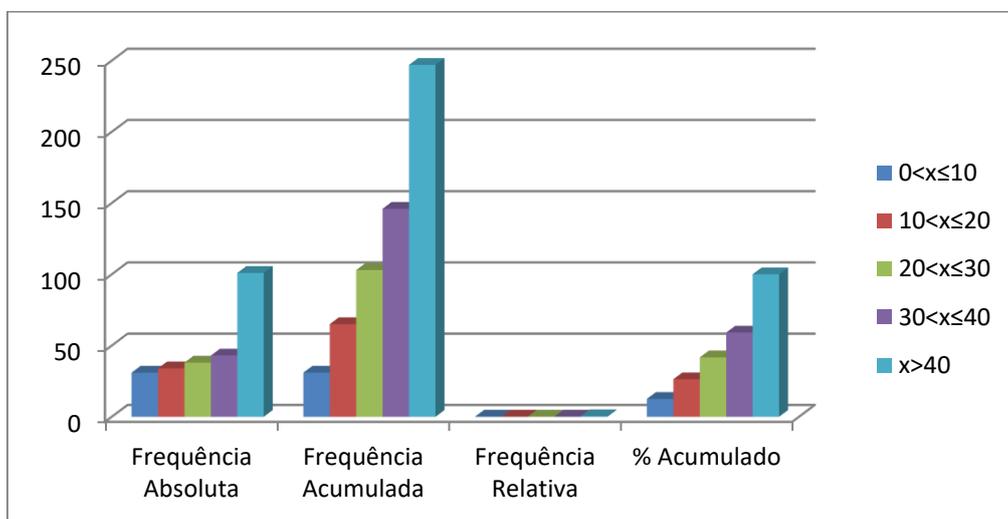
**Figura 6.55: Frequências das classes de profundidade dos níveis estáticos dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

#### 6.4.1.4 Nível Dinâmico

Para os níveis dinâmicos dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, tem-se que a classe menos frequente corresponde ao intervalo de 0 a 10 m (12,55%). Secundariamente, cerca de 14% dos poços (34/251) estão no intervalo entre 10 e 20 metros, como pode ser observado na Tabela 6.44 e Figura 6.56. Nota-se, finalmente, que a grande maioria dos níveis dinâmicos (144/251), representando 58%, situa-se na classe de profundidades maiores que 30 metros. A classe mais frequente (101/251) tem profundidades acima de 40 metros.

**Tabela 6.44 – Distribuição de frequência da profundidade dos níveis dinâmicos dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Nível Dinâmico (m)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
$0 < x \leq 10$	31	31	0,13	12,55
$10 < x \leq 20$	34	65	0,14	26,32
$20 < x \leq 30$	38	103	0,15	41,70
$30 < x \leq 40$	43	146	0,17	59,11
$x > 40$	101	247	0,41	100,00
<b>Total</b>	<b>247</b>			



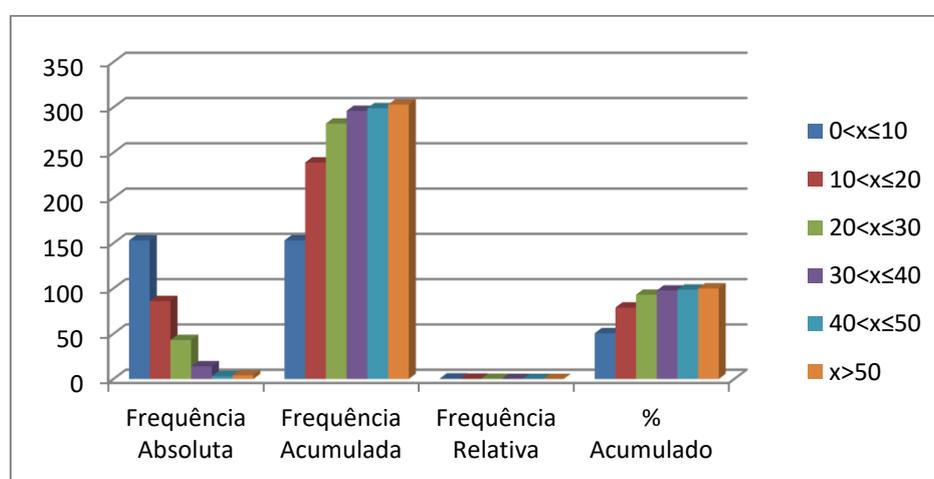
**Figura 6.56: Frequências das classes dos níveis dinâmicos dos poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

#### 6.4.1.5 Vazão

No que se refere à vazão dos poços, verifica-se que do total cadastrado existem 303 poços com vazão informada. Observa-se (Tabela 6.45 e Figura 6.57) que a classe mais frequente é a de 0 a 10 m<sup>3</sup>/h, com aproximadamente 50% e frequência absoluta de 153 poços. A classe de menor frequência é o intervalos de 40 a 50 m, com apenas 0,99% do total.

**Tabela 6.45 – Distribuição de frequência da vazão dos poços levantados no SIAGAS/CPRM, CERB e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Vazão (m³/h)	Frequência Absoluta	Frequência Acumulada	Frequência Relativa	% Acumulado
0<x≤10	153	153	0,50	50,50
10<x≤20	86	239	0,28	78,88
20<x≤30	43	282	0,14	93,07
30<x≤40	14	296	0,05	97,69
40<x≤50	3	299	0,01	98,68
x>50	4	303	0,01	100,00
<b>Total</b>	<b>303</b>			



**Figura 6.57: Frequências das classes de vazão dos poços cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Não obstante, de acordo com as condições operacionais em que se encontram os poços (Tabela 6.46) verifica-se que existem 403 unidades (93,3%) em condições de funcionamento, ou seja, são poços que estão bombeando (19,4%), estão equipados e/ou parados (33,4%) e 218 (50,5%) utilizáveis, conforme ANEXO 3.4 – Tabela de poços da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

**Tabela 6.46 – Situação operacional dos 431 poços catalogados e cadastrados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Registros	Bombeando	Equipado	Parado	Não Utilizável	Utilizáveis	Potencialmente produtores
<b>431</b>	84	72	29	29	218	403
<b>100%</b>	19,4%	16,7%	6,7%	6,7%	50,5%	93,3%

### 6.4.1.6 Regime de Funcionamento dos Poços

Na Tabela 6.47 são mostradas as horas diárias de bombeamento, obtidas do cadastro do Projeto, organizadas por classe.

Existem apenas 69 poços com regime de funcionamento informado e o cálculo do regime médio de funcionamento para todos os 156 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 pelo somatório do regime médio ponderado pela frequência relativa ou fator de ponderação.

**Tabela 6.47 – Estimativa do regime médio de funcionamento dos poços da área piloto da Bacia do Riacho do Juá, usando 69 poços do cadastro de água subterrânea realizado no âmbito do projeto.**

Classe Regime Informado (h/dia)	Frequência Absoluta Número de Poços $n_j$	Regime Médio Informado - Rej (h/dia)	Frequência Relativa ou Peso $w_j=n_j/N$	Regime médio ponderado (h/dia) $Rej \cdot w_j$
0<x≤1	5	0,850	0,072	0,062
1<x≤2	7	2,000	0,101	0,203
2<x≤3	9	3,000	0,130	0,391
3<x≤4	3	4,000	0,043	0,174
4<x≤5	3	5,000	0,043	0,217
5<x≤6	7	6,000	0,101	0,609
6<x≤7	1	7,000	0,014	0,101
7<x≤8	8	8,000	0,116	0,928
8<x≤9	0	0,000	0,000	0,000
9<x≤10	3	10,000	0,043	0,435
10<x≤11	0	0,000	0,000	0,000
11<x≤12	11	12,000	0,159	1,913
12<x≤24	12	19,917	0,174	3,464
<b>Total</b>	<b>69</b>			<b>8,496</b>

**Legenda:**

$N = \sum n_j = n^\circ$  total de poços com regime de funcionamento informado o novo cadastro de água subterrânea realizado ao longo do projeto.

Frequência Absoluta ( $n_j$ ):  $n^\circ$  de poços com regime de funcionamento informado o novo 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 :  $w_j = n_j / N$ .

Regime Médio Estimado:  $\bar{R}_e = \sum_{j=1}^{13} R_{ej} \times W_j$  8 horas e 30 minutos.

Como visto na Tabela 6.48, o regime médio de funcionamento estimado para os poços na área piloto da Bacia do Riacho do Juá em 2015 é de 8,496 horas por dia, o que equivale a aproximadamente 8h:30 min.

A discussão acima permite os seguintes comentários:

- A profundidade dos poços inventariados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá variou de 17 a 220 m, com média aproximada de 95,4 m, sendo que os poços nos intervalos acima de 60 metros constituem a classe mais frequentes (86%);
- Os níveis estáticos estão concentrados nas classes até 20 m (71%), sendo que 36% dos poços possuem níveis estáticos entre 10 e 20 m de profundidade e 35% dos poços níveis entre 0 e 10 m. 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 50% dos casos são menores ou iguais a 10 m<sup>3</sup>/h e nos 50% restantes oscilam entre mais de 10 m<sup>3</sup>/h até 68,9 m<sup>3</sup>/h;
- Em termos de condições operacionais, do total de 431 poços existem 13 poços parados, 29 considerados não utilizáveis e ainda 234 poços sem informação sobre situação operacional. Dos poços com condições de utilização registra-se: 84 poços bombeando, 72 equipados na área piloto da Bacia do Riacho do Juá;
- No que diz respeito ao equipamento de bombeamento instalado, verificou-se que nos 81 poços com informações têm-se 3 com cata-vento, 73 com bomba submersa e 5 com compressor de ar.

#### 6.4.2 Produção global dos poços

De 431 poços catalogados, registram-se 29 não utilizáveis ou abandonados, restando 403 potencialmente produtores dos quais 303 com vazão informada. Assim sendo, usando o regime de funcionamento (8,5 horas/dia) e a vazão média das diferentes classes de vazão, apresentados na Tabela 6.48, obtém-se uma produção estimada de 44.635,29 m<sup>3</sup>/dia, ou 16,3 hm<sup>3</sup>/ano, para os 403 poços.

**Tabela 6.48 - Produção global estimada, explotada na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Classe Vazão (m³/h)	Frequência Absoluta	Frequência Relativa	Vazão Média (m³/h)	Efetivo de Poços	Vazão Estimada (m³/dia)	Vazão Estimada (m³/s)	
						403 poços	303 poços
0<x≤1	23	0,08	0,45	31	118,575	0,001	0,001
1<x≤2,5	24	0,08	1,72	32	467,84	0,005	0,004
2,5<x≤5	35	0,12	3,81	46	1489,71	0,017	0,013
5<x≤7,5	35	0,12	6,36	46	2486,76	0,029	0,022
7,5<x≤10	36	0,12	8,89	48	3627,12	0,042	0,031
10<x≤15	54	0,18	12,76	72	7809,12	0,090	0,068
15<x≤30	75	0,25	21,77	100	18504,5	0,214	0,161
x>30	21	0,07	42,57	28	10131,66	0,117	0,088
<b>Total</b>	<b>303</b>			<b>403</b>	<b>44.635,29</b>	<b>0,517</b>	<b>0,388</b>

**Legenda:**

**N** = número total de poços com vazão informada no cadastro de água subterrânea realizado ao longo do projeto .

**Frequência Absoluta (FA)** = número de poços com vazão informada no cadastro de água subterrânea realizado ao longo do projeto, 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 potencialmente produtores 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).

#### 6.4.2.1 Mapa da produção de água na área do Riacho do Juá

O mapa de distribuição espacial da produção de água estimada na área do Riacho do Juá a partir das vazões informadas é apresentado na Figura 6.58. Numa amostra de 403 poços, a vazão média por poço é de 12,3 m³/h, (diferente do informado acima, utilizar moda talvez) com desvio padrão de 13,12 m³/h. Esse desvio configura um coeficiente de variação em torno de 100% que reflete a variação que ocorre na produção dos poços, com um mínimo de 0,1 m³/h e um máximo de 68,87 m³/h, consistente com o comportamento dos terrenos cársticos.

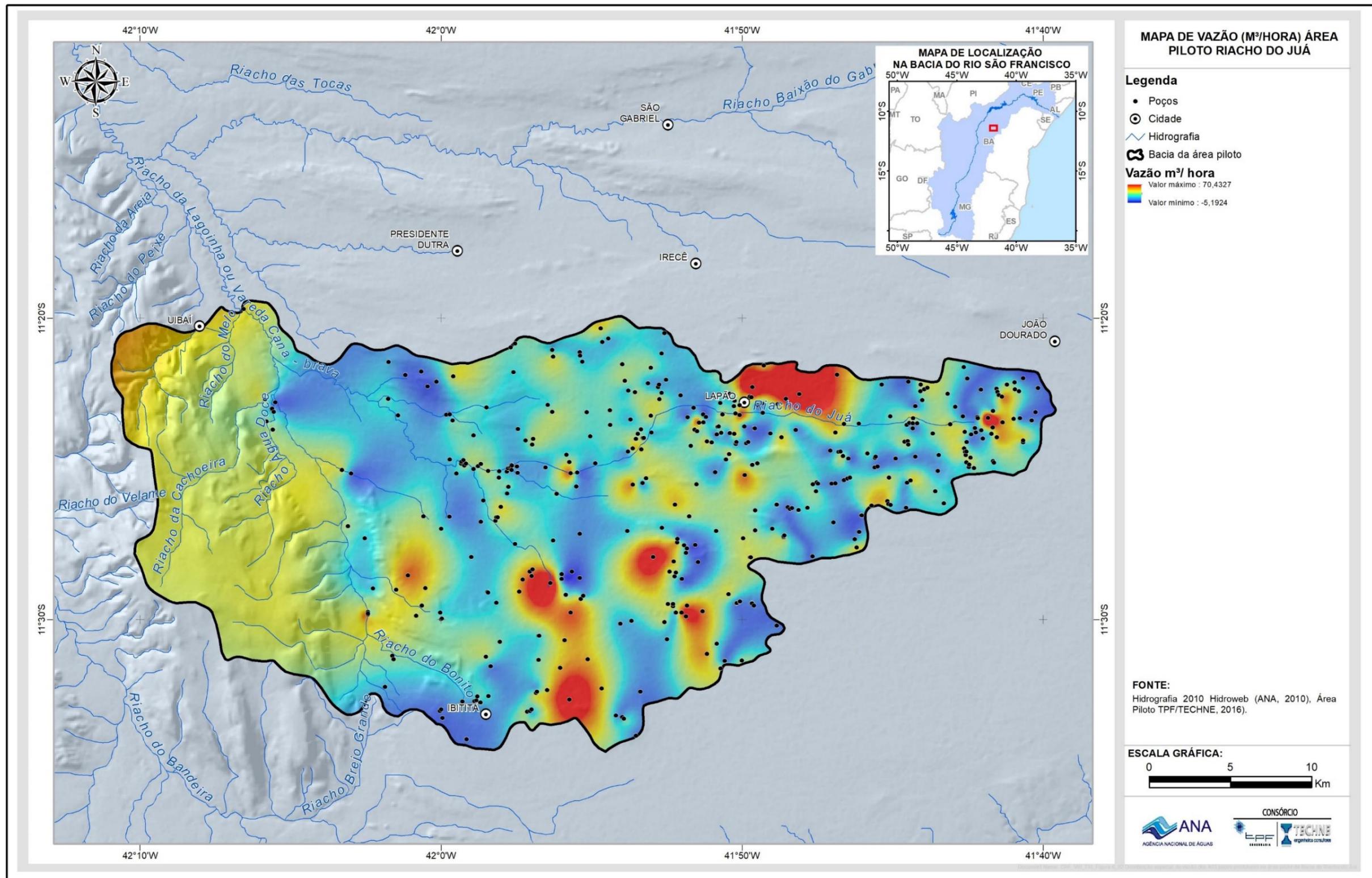


Figura 6.58: Distribuição espacial da vazão dos 403 poços produtores na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

### 6.4.3 Zoneamento da Exploração

Foram elaborados mapas de produção de água e de zoneamento das explorações seguindo a metodologia descrita a seguir.

O mapa de zoneamento da exploração foi elaborado dividindo-se a área de estudo, isto é, a bacia hidrográfica do riacho do Juá, com uma superfície de 966,00 km<sup>2</sup>, em 23 células quadradas de 4 minutos de lado, cada uma delas equivalente a uma área de 7,34 x 7,34 ≈ 53,88 km<sup>2</sup>.

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. Entretanto, a facilidade e a presteza do reabastecimento desses aquíferos são apenas uma face da moeda. A outra face é a quase que imediata restituição das águas subterrâneas à rede hidrográfica, às fontes, brejos e exutórios em geral. Nessas condições, é lícito admitir que o bombeamento de poços possa retirar, ao longo do ano, certa porção dos recursos renováveis, fazendo reduzir a descarga subterrânea medida numa dada estação fluviométrica. Sob esta ótica, as recargas do aquífero, avaliadas em estações fluviométricas, seriam subestimadas e precisariam ser corrigidas a bem da verossimilhança. Intuitivamente, à primeira vista, essa correção implicaria adicionar a descarga dos poços à descarga avaliada no(s) hidrograma(s) utilizado(s), de modo a se obter a recarga que ocorreria na ausência de bombeamentos. Esse procedimento, entretanto, esbarra no desconhecimento do real número de poços, no desconhecimento das reais vazões de exploração, e no desconhecimento dos reais regimes de bombeamento. As avaliações das recargas, por sua vez, utilizam porosidades efetivas<sup>12</sup> que encerram um grau de incerteza não desprezível. Essas avaliações, ademais, não devem ser encaradas como valores definitivos, mas constituem, antes, informações iniciais de partida, destinadas a servir de base aos procedimentos de gestão que deverão ser adotados pelo órgão gestor da Bahia. Nessas condições, consideram-se convenientes e sensatas, quantificações conservadoras no início do processo de gestão, de modo a não encorajar vultosos empreendimentos na região, sem a necessária convicção de que os mesmos se tornarão sustentáveis e produtivos no futuro. Considera-se preferível adotar essa postura e, a partir daí, o órgão gestor deverá continuar os estudos zelando para que as quantificações de recarga sejam ampliadas – ou não – com segurança, na medida em que os novos conhecimentos adquiridos assim recomendem.

Em face do acima exposto, as recargas avaliadas no item 6.5.3 não sofreram correções. Em cada célula da malha regular foi realizado um balanço hídrico tendo como vazão de entrada a recarga média da célula e como vazão de saída a descarga produzida pelos poços existentes. Esse balanço é apresentado na Tabela 6.49 e na Figura 6.59. Verifica-se que em 74% das células (17/23) existe déficit hídrico, havendo excedente apenas nas células 1,

---

<sup>12</sup> Porosidades efetivas equivalentes.

7, 8, 9, 14 e 20, correspondentes aos quartzitos da Serra do Uibaí (Grupo Chapada Diamantina).

A situação mais crítica ocorre nas células: C10 (-0,040 m<sup>3</sup>/s), C11 (-0,023 m<sup>3</sup>/s), C12 (-0,048 m<sup>3</sup>/s), C13 (-0,044 m<sup>3</sup>/s) e C14 (-0,037 m<sup>3</sup>/s). O déficit total encontrado na área é de 324 L/s ou 28.003,00 m<sup>3</sup>/dia, para uma recarga de 7,4 mm/ano equivalente a cerca de 20 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.dia.

**Tabela 6.49 – Balanço entre a recarga e as retiradas de água através de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

Célula	x	y	Número de poços	Área km <sup>2</sup>	Recarga m <sup>3</sup> /d	Descarga m <sup>3</sup> /d	Saldo (m <sup>3</sup> /dia) e (m <sup>3</sup> /s)		Poço por km <sup>2</sup>
C01	-42,0899	-11,3534	6	37,98	770,0	664,5	105	0,001	0,2
C02	-42,0231	-11,3534	9	27,71	561,8	996,8	-435	-0,005	0,3
C03	-41,9563	-11,3534	12	30,42	616,7	1.329,1	-712	-0,008	0,4
C04	-41,8896	-11,3534	19	37,47	759,7	2.104,4	-1.345	-0,016	0,5
C05	-41,8228	-11,3534	17	20,29	411,4	1.882,9	-1.472	-0,017	0,8
C06	-41,7561	-11,3534	9	17,43	353,4	996,8	-643	-0,007	0,5
C07	-41,6893	-11,3534	17	18,86	382,4	1.882,9	-1.501	-0,017	0,9
C08	-42,0899	-11,4201	2	53,88	1.092,4	221,5	871	0,010	0,0
C09	-42,0231	-11,4201	9	53,88	1.092,4	996,8	96	0,001	0,2
C10	-41,9563	-11,4201	41	53,88	1.092,4	4.541,1	-3.449	-0,040	0,8
C11	-41,8896	-11,4201	28	53,88	1.092,4	3.101,2	-2.009	-0,023	0,5
C12	-41,8228	-11,4201	47	53,88	1.092,4	5.205,6	-4.113	-0,048	0,9
C13	-41,7561	-11,4201	43	46,94	951,7	4.762,6	-3.811	-0,044	0,9
C14	-41,6893	-11,4201	33	22,52	456,6	3.655,0	-3.198	-0,037	1,5
C15	-42,0231	-11,4869	13	53,88	1.092,4	1.439,8	-347	-0,004	0,2
C16	-41,9563	-11,4869	19	53,88	1.092,4	2.104,4	-1.012	-0,012	0,4
C17	-41,8896	-11,4869	25	53,88	1.092,4	2.768,9	-1.677	-0,019	0,5
C18	-41,8228	-11,4869	20	34,47	698,8	2.215,2	-1.516	-0,018	0,6
C19	-41,7561	-11,4869	2	3,28	66,5	221,5	-155	-0,002	0,6
C20	-42,0231	-11,5536	4	26,11	529,4	443,0	86	0,001	0,2
C21	-41,9563	-11,5536	19	34,32	695,8	2.104,4	-1.409	-0,016	0,6
C22	-41,8896	-11,5536	5	28,38	575,4	553,8	22	0,000	0,2
C23	-41,8228	-11,5536	4	3,17	64,3	443,0	-379	-0,004	1,3
<b>Total</b>							<b>-28.003</b>	<b>-0,324</b>	

A reserva explotável (RE) é considerada como uma fração da recarga. No presente caso essa fração foi considerada como sendo igual a 0,30, com base nas litologias que ocorrem na área piloto (calcários da Formação Salitre).

Fazendo-se o balanço em relação à reserva explotável (RE) verifica-se que existe déficit global de 39.646,00 m<sup>3</sup>/dia ou 459 L/s mostrado pelos valores marcados em vermelho na Tabela 6.50. Nas células deficitárias é recomendável a implantação de dispositivos de monitoramento automático permanente de níveis e descargas dos poços para a aquisição de dados com o objetivo de limitar com segurança as retiradas globais superiores à reserva explotável, que serve de referência para as outorgas de água subterrânea.

**Tabela 6.50 – Balanço entre a reserva explotável (RE) e a produção de água de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, no ano de 2014.**

Célula	x	y	Número de poços	Área km <sup>2</sup>	Recarga m <sup>3</sup> /d	Descarga m <sup>3</sup> /d	Saldo Recarga m <sup>3</sup> /dia	Poço por km <sup>2</sup>	RE m <sup>3</sup> /dia	Saldo RE m <sup>3</sup> /dia	m <sup>3</sup> /s
<b>C01</b>	-42,09	-11,353	6	37,98	770,0	664,5	105,5	0,2	231,0	<b>-433,5</b>	-0,005
<b>C02</b>	-42,023	-11,353	9	27,71	561,8	996,8	-435,0	0,3	168,5	<b>-828,3</b>	-0,010
<b>C03</b>	-41,956	-11,353	12	30,42	616,7	1329,1	-712,4	0,4	185,0	<b>-1144,1</b>	-0,013
<b>C04</b>	-41,89	-11,353	19	37,47	759,7	2104,4	-1344,7	0,5	227,9	<b>-1876,5</b>	-0,022
<b>C05</b>	-41,823	-11,353	17	20,29	411,4	1882,9	-1471,5	0,8	123,4	<b>-1759,5</b>	-0,020
<b>C06</b>	-41,756	-11,353	9	17,43	353,4	996,8	-643,4	0,5	106,0	<b>-890,8</b>	-0,010
<b>C07</b>	-41,689	-11,353	17	18,86	382,4	1882,9	-1500,5	0,9	114,7	<b>-1768,2</b>	-0,020
<b>C08</b>	-42,09	-11,42	2	53,88	1092,4	221,5	870,8	0,0	327,7	106,2	0,001
<b>C09</b>	-42,023	-11,42	9	53,88	1092,4	996,8	95,5	0,2	327,7	<b>-669,1</b>	-0,008
<b>C10</b>	-41,956	-11,42	41	53,88	1092,4	4541,1	-3448,7	0,8	327,7	<b>-4213,4</b>	-0,049
<b>C11</b>	-41,89	-11,42	28	53,88	1092,4	3101,2	-2008,8	0,5	327,7	<b>-2773,5</b>	-0,032
<b>C12</b>	-41,823	-11,42	47	53,88	1092,4	5205,6	-4113,2	0,9	327,7	<b>-4877,9</b>	-0,056
<b>C13</b>	-41,756	-11,42	43	46,94	951,7	4762,6	-3810,9	0,9	285,5	<b>-4477,1</b>	-0,052

**Tabela 6.50 – Balanço entre a reserva explotável (RE) e a produção de água de poços em exploração na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, no ano de 2014 – Continuação.**

Célula	x	y	Número de poços	Área km <sup>2</sup>	Recarga m <sup>3</sup> /d	Descarga m <sup>3</sup> /d	Saldo Recarga m <sup>3</sup> /dia	Poço por km <sup>2</sup>	RE m <sup>3</sup> /dia	Saldo RE m <sup>3</sup> /dia	m <sup>3</sup> /s
<b>C14</b>	-41,689	-11,42	33	22,52	456,6	3655,0	-3198,4	1,5	137,0	<b>-3518,0</b>	-0,041
<b>C15</b>	-42,023	-11,487	13	53,88	1092,4	1439,8	-347,5	0,2	327,7	<b>-1112,1</b>	-0,013
<b>C16</b>	-41,956	-11,487	19	53,88	1092,4	2104,4	-1012,0	0,4	327,7	<b>-1776,7</b>	-0,021
<b>C17</b>	-41,89	-11,487	25	53,88	1092,4	2768,9	-1676,6	0,5	327,7	<b>-2441,2</b>	-0,028
<b>C18</b>	-41,823	-11,487	20	34,47	698,8	2215,2	-1516,3	0,6	209,7	<b>-2005,5</b>	-0,023
<b>C19</b>	-41,756	-11,487	2	3,28	66,5	221,5	-155,0	0,6	19,9	<b>-201,6</b>	-0,002
<b>C20</b>	-42,023	-11,554	4	26,11	529,4	443,0	86,3	0,2	158,8	<b>-284,2</b>	-0,003
<b>C21</b>	-41,956	-11,554	19	34,32	695,8	2104,4	-1408,6	0,6	208,7	<b>-1895,7</b>	-0,022
<b>C22</b>	-41,89	-11,554	5	28,38	575,4	553,8	21,6	0,2	172,6	<b>-381,2</b>	-0,004
<b>C23</b>	-41,823	-11,554	4	3,17	64,3	443,0	<b>-378,8</b>	1,3	19,3	<b>-423,7</b>	-0,005
<b>Totais</b>										<b>-39.646</b>	<b>-0,459</b>

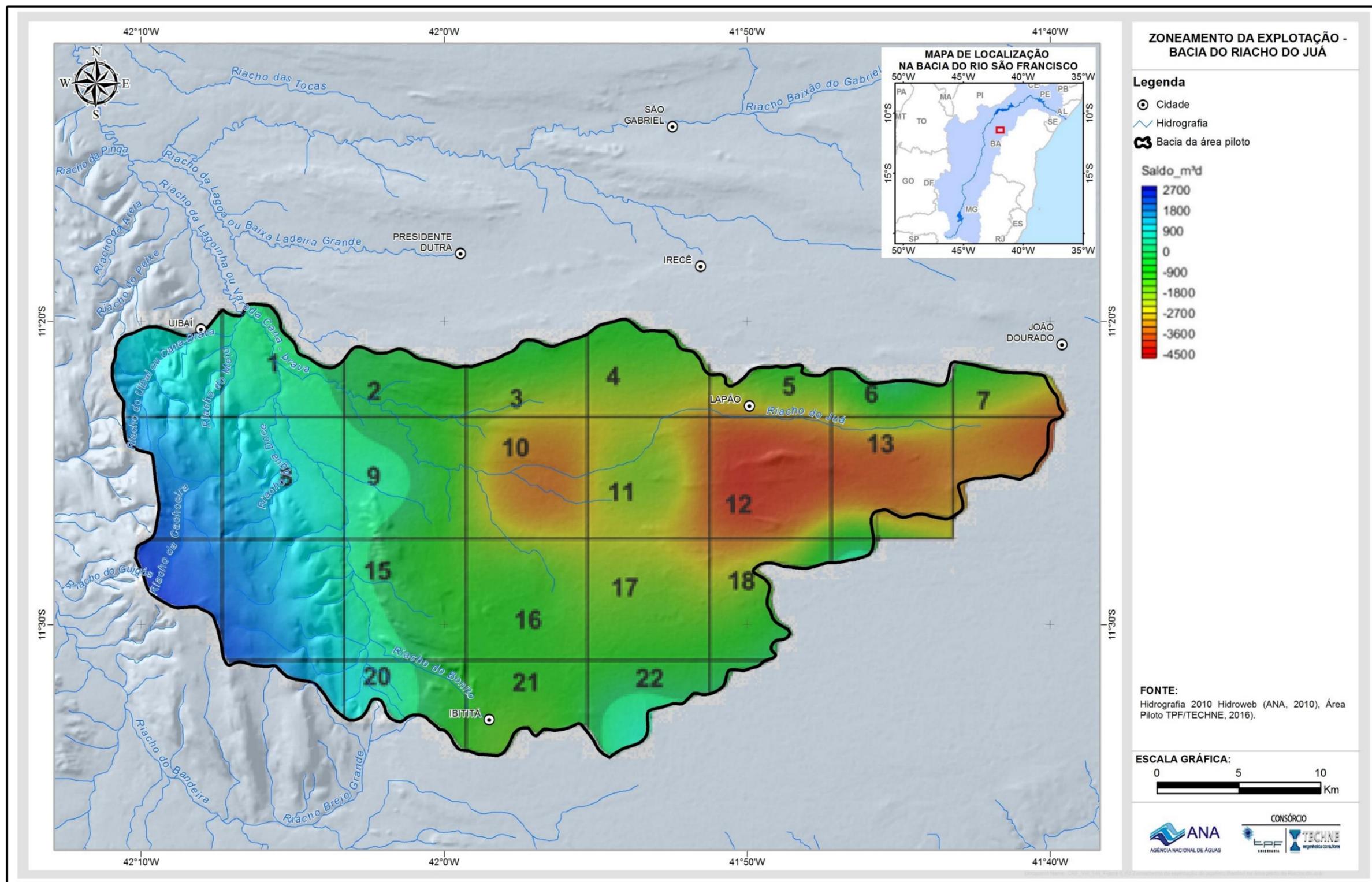


Figura 6.59: Zoneamento da exploração do aquífero Bambuí na área piloto do Riacho do Juá mostrando a maioria das células com déficit hídrico significativo.

## 7. Hidroquímica

### 7.1 Amostragem de águas

Foram realizadas duas campanhas de amostragem de águas na Bacia do Riacho do Juá.

A primeira campanha foi realizada no período de 19 a 21 de agosto de 2014, representando o período seco da região e a segunda campanha foi realizada no período de 17 de março a 13 de abril de 2015, representando o período úmido. Em ambas as campanhas, foram coletados 13 pontos de água subterrânea no aquífero Salitre e unicamente na segunda campanha foi coletada uma amostra de água no aquífero pertencente à Formação Morro do Chapéu.

A amostragem contou da coleta de águas para a determinação de quatro 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, clorantraniliprole, clorfenapir, clorotalonil, clorpirifós + clorpirifós-oxon, deltametrina, dibromofluorometano, difenoconalzo, dimetoato, diurom, famaxadona, fenitrotiom, fenpropatrim, flumioxazim, glifosato + ampa, imidaclopride, iprodiona, linurom, metalaxil, p-bromofluorbenzeno, picoxistrobina, piraclostrobina, procimidona, tebuconazol, tetraconazol, tiabendazole, tiamentoxam, tiofanato metílico, triazofós, trifloxistrobina;
- **Isótopos:** Oxigênio-18 ( $^{18}\text{O}$ ), Deutério ( $^2\text{H}$ ), Trítio ( $^3\text{H}$ )<sup>13</sup> e Estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ).

Na primeira campanha foram determinados apenas os parâmetros físico-químicos e na segunda 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

---

<sup>13</sup> Os resultados de trítio apresentaram problemas analíticos e, portanto, não foi possível a sua utilização nesse estudo.

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 oxirredução.

### 7.1.1 Rede de Amostragem

A localização e distribuição dos poços amostrados na área da Bacia do Riacho do Juá 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 Riacho do Juá e respectivos parâmetros analisados.**

ID	Amostra	1° Campanha (período seco)	2° Campanha (período úmido)
C-030	Subterrânea	Físico-químicos	-
C-030A	Subterrânea	-	Físico-químicos, agroquímicos.
C-031	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-032	Subterrânea	Físico-químicos	
C-033	Subterrânea	-	Físico-químicos, isótopos, agroquímicos.
C-034	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-035	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-036	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-037	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-038	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais, agroquímicos.
C-039	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-040	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais, isótopos, agroquímicos.
C-041	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, agroquímicos.
C-042	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, BTEX, fenóis e metais, agroquímicos.
C-217	Subterrânea	Físico-químicos	Físico-químicos, isótopos, agroquímicos.



### 7.1.2 Procedimentos de Coleta

Nos casos em que as bombas dos poços encontravam-se desligadas no momento da coleta, procedeu-se com 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 7.5.

Os frascos utilizados na coleta das águas foram fornecidos pelo laboratório. Imediatamente após a coleta eles foram acondicionados em caixas térmicas com gelo (Figura 7.5) e encaminhados por via aérea ou terrestre ao laboratório de forma que a sua determinação desse início em até 24 horas após a coleta.

**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 (µS/cm)	HANNA - HI8731; HI98129
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	HANNA - HI98129; HI8731
Potencial de oxi-redução ( 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 – 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, 2005)**

ID Método	Parâmetros	Limite	Unidade	Preservante + Frasco (todos refrigerados)	Tempo para Análise
<b>Titulação potenciométrica</b>	Alcalinidade Total	0	mg/L	Frasco Plástico de 1L refrigerado (1)	14 dias
	Bicarbonato (como CaCO <sub>3</sub> )	0	mg/L		
	Carbonato (como CaCO <sub>3</sub> )	0	mg/L		
<b>Cromatografia de íons</b>	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		
<b>Leitura em condutímetro</b>	Condutividade	0,1	µS/cm	Mesmo (1)	28 dias

**Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. (APHA, 2005) – Continuação.**

ID Método	Parâmetros	Limite	Unidade	Preservante + Frasco (todos refrigerados)	Tempo para Análise
<b>Espectrofotometria</b>	Cor Aparente	5	Pt/Co	Mesmo (1)	48 horas
<b>Titulação potenciométrica</b>	Dureza Total	5	mg/L	Frasco 500 mL com H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> até pH < 2 (4)	6 meses
<b>Flow Injection Analysis (FIA)</b>	Fenóis Totais	0,001	mg/L	Mesmo (4)	14 dias
<b>ICP-MS</b>	Arsênio	1	µg/L	Frasco 500 mL com HNO <sub>3</sub> 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			
<b>Espectrofotometria</b>	Amônia (como NH <sub>3</sub> )	0,1	mg/L	Mesmo (4)	14 dias
<b>Gravimetria</b>	Sólidos Dissolvidos Totais	5	µg/L	Mesmo (1)	7 dias
<b>GCMS</b>	Benzeno	1	µg/L	2 vials de 40 mL preservados com HCl (6 e 7)	14 dias
	Etilbenzeno	1	µg/L		
	m,p-Xilenos	2	µg/L		
	o-Xileno	1	µg/L		
	Tolueno	1	µg/L		

**Tabela 7.3 – Métodos analíticos utilizados e limite de quantificação (LQ) dos parâmetros de análise. (APHA, 2005) – Continuação.**

ID Método	Parâmetros	Limite	Unidade	Preservante + Frasco (todos refrigerados)	Tempo para Análise
<b>Turbidímetro</b>	Turbidez	0,1	NTU	Mesmo (1)	48 horas
<b>LCMSMS e GCMSMS</b>	Agroquímicos	0,1	µg/L	Vidro âmbar	14 dias
<b>Radioatividade</b>	Deutério (2H)	-	‰ VSMOW	Frasco âmbar 1 L com HNO <sub>3</sub> até pH < 2 (7)	180 dias
<b>Radioatividade</b>	Estrôncio (87Sr/86Sr)	-		Mesmo (7)	180 dias
<b>Radioatividade</b>	Oxigênio-18	-	‰ VSMOW	Mesmo (7)	180 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, sendo estas 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 Riacho do Juá. A Tabela 7.4 apresenta uma síntese dos resultados no período seco.

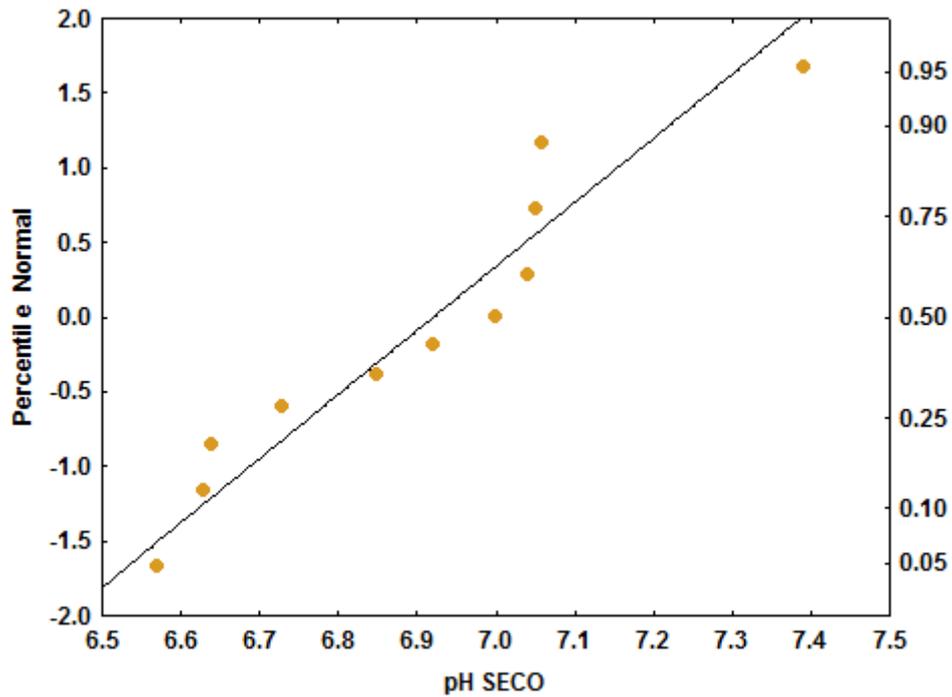
**Tabela 7.4 – Resultados de p valor para os testes de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov, nas amostras de água coletadas na Bacia do Riacho do Juá, no período seco.**

Variáveis	Período Seco		
	N	p value	NORMAL
pH	13	> 0,20	Sim
Temperatura (°C)	13	> 0,20	Sim
CE (µS/cm)	13	> 0,20	Sim
STD (mg/L)	13	> 0,20	Sim
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	13	<0,20	Sim
Cálcio (mg/L)	13	>0,20	Sim
Magnésio (mg/L)	13	>0,20	Sim
Sódio (mg/L)	13	> 0,20	Sim
Potássio (mg/L)	13	> 0,20	Sim
Bicarbonato (mg/L)	13	> 0,20	Sim
Sulfato (mg/L)	13	> 0,20	Sim
Cloreto (mg/L)	13	>0,20	Sim
Fluoreto (mg/L)	13	< 0,15	Não
Nitrato (mg/L N)	13	<0,20	Sim
Ferro (mg/L)	13	< 0,05	Não
Manganês (mg/L)	13	< 0,05	Não

Os testes de Kolmogorov-Smirnov indicaram uma distribuição normal ou próximo de normal para o pH, Temperatura, CE, STD, dureza, cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, sulfato, cloreto e nitrato. Tiveram distribuição considerada não-normal, as variáveis: fluoreto, ferro e manganês.

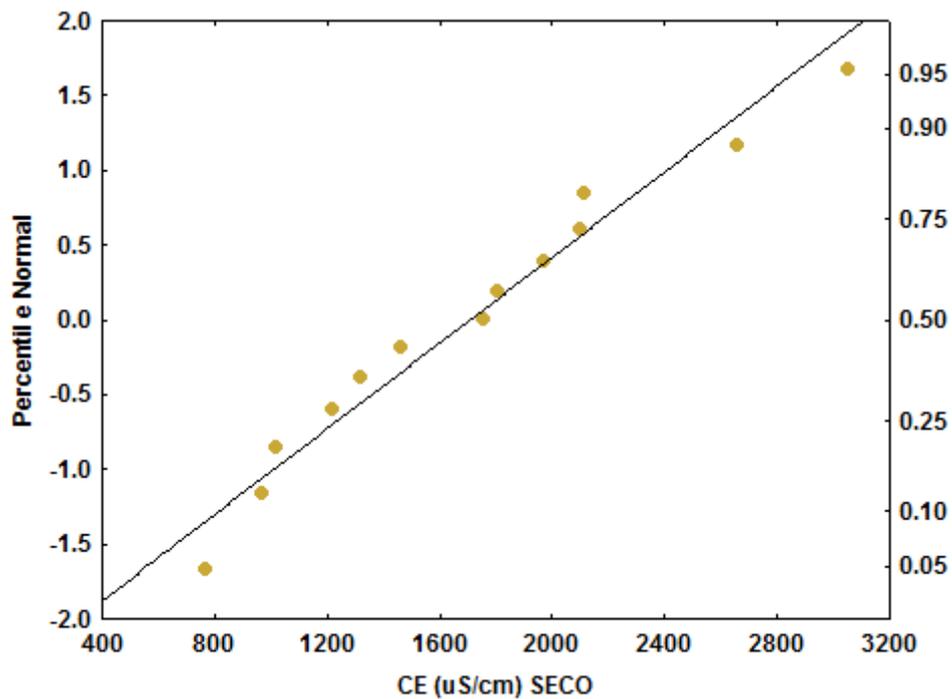
Para entender e reforçar a distribuição dos resultados e normalidade foram construídos gráficos de probabilidade para as variáveis estudadas. Alguns exemplos ilustrativos serão apresentados a seguir.

O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para os dados de pH (Figura 7.6), no período seco, indica uma distribuição normal tanto na análise de gráfico com na distribuição relativamente contínua e próxima a linha de normalidade, como no p value suficientemente grande, maior do que o a-level determinado (Tabela 7.4). A Figura 7.6 mostra que a maioria das amostras (cerca de 90% do universo amostral) registram valores de pH entre 6,6 a 7,1 e apenas uma amostra apresenta valor de 7,4.



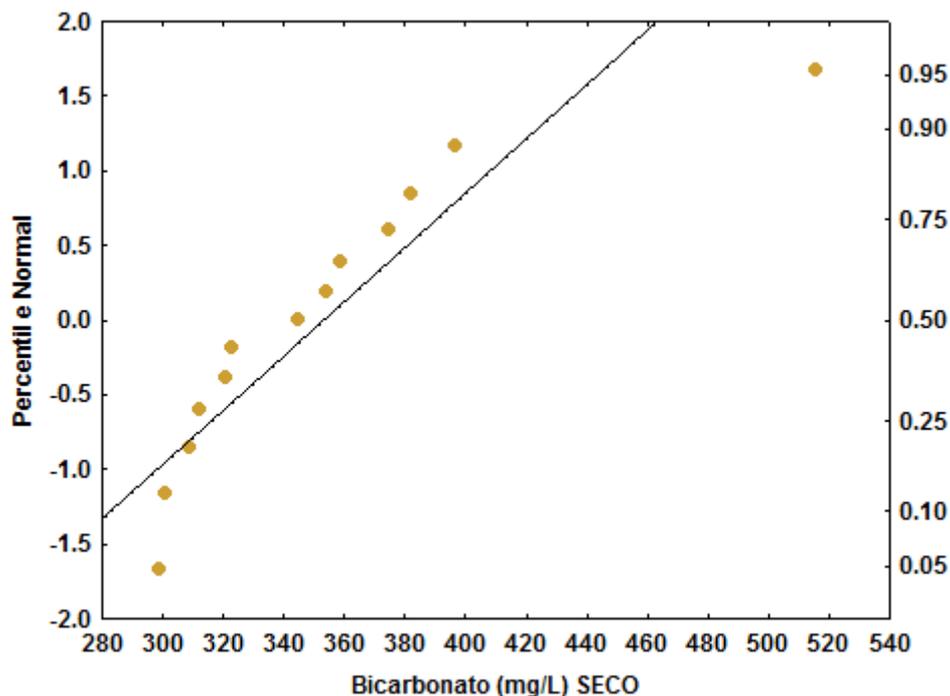
**Figura 7.6: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

Os resultados de CE no gráfico de probabilidade da Figura 7.7 mostram que as amostras apresentam distribuição muito próxima à linha de normalidade. Essa feição de distribuição reforça o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.4.



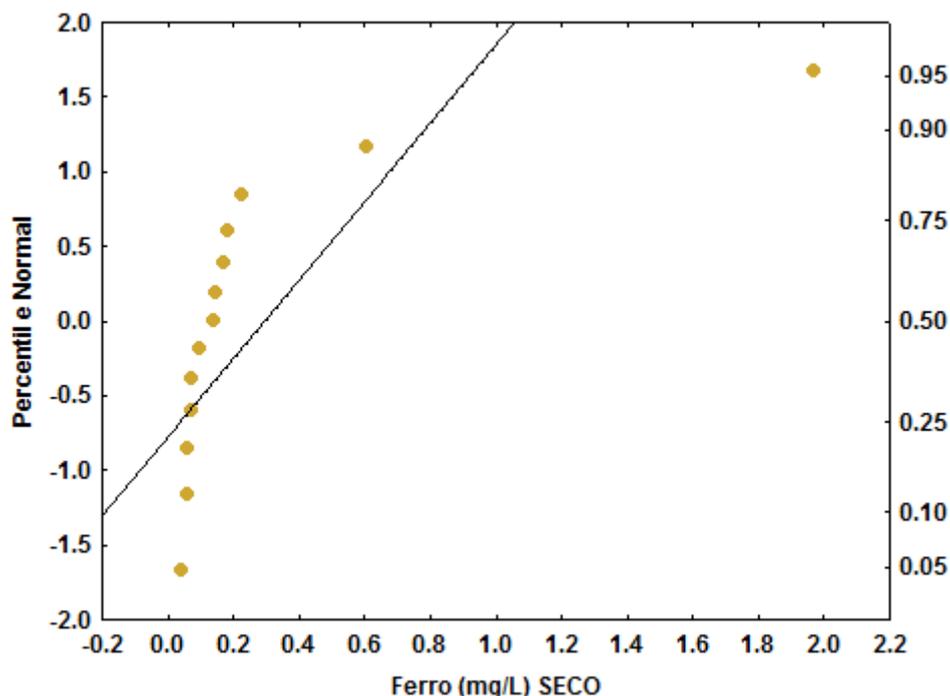
**Figura 7.7: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

Os resultados de bicarbonato, no gráfico de probabilidade da Figura 7.8, mostram uma distribuição, para a maioria das amostras, próxima à linha de normalidade, com exceção das amostras de valores mínimos e, especialmente, as de valor máximo que se encontram relativamente afastadas da linha de normalidade. O comportamento mais geral, entretanto, justifica o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.4.



**Figura 7.8: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do bicarbonato (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

Os resultados de ferro, distribuídos no gráfico de probabilidade da Figura 7.9, mostram um relativo afastamento em relação à linha de normalidade, perceptível especialmente para as amostras com teores mais baixos. Nota-se que a maior parte dos resultados de ferro são baixos e relativamente similares, levando a uma distribuição discordante da linha de normalidade. Esse comportamento na distribuição dos resultados de ferro justifica o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.4.



**Figura 7.9: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do ferro (período seco). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

A Tabela 7.5 apresenta uma síntese dos resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para as amostras da Bacia do Riacho do Juá coletadas no período úmido.

Os testes de Kolmogorov-Smirnov no período úmido indicaram uma distribuição normal ou próximo de normal para pH, CE, STD, dureza, cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, sulfato, cloreto e nitrato. Tiveram distribuição considerada não-normal, as variáveis: temperatura, fluoreto, ferro e manganês. Os resultados quanto à normalidade dos testes de Kolmogorov-Smirnov no período úmido foram similares aos do período seco, com a exceção do parâmetro temperatura. No período úmido a maioria das medições da temperatura tiveram valor de 25 °C, o que levou a uma caracterização de não normalidade para esse período.

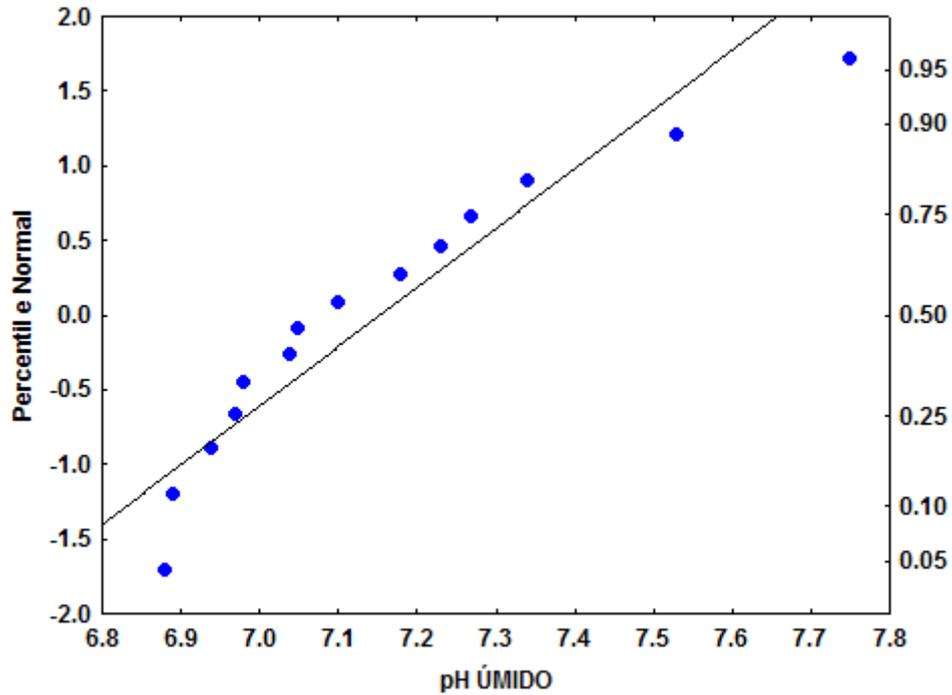
Para entender e reforçar a distribuição dos resultados e normalidade foram construídos gráficos de probabilidade para as variáveis estudadas. Alguns exemplos ilustrativos serão apresentados a seguir.

**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 Riacho do Juá, no período úmido.**

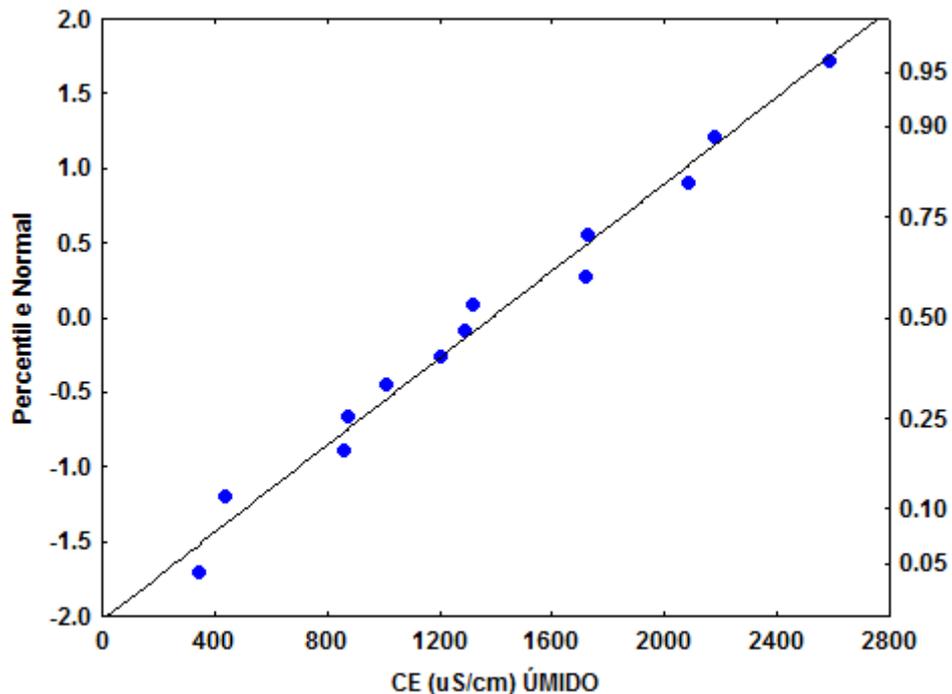
Variáveis	Período Úmido		
	N	p value	NORMAL
pH	14	> 0,20	Sim
Temperatura (°C)	14	< 0,01	Não
CE (µS/cm)	14	> 0,20	Sim
STD (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	14	> 0,20	Sim
Cálcio (mg/L)	14	>0,20	Sim
Magnésio (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Sódio (mg/L)	14	>0,20	Sim
Potássio (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Bicarbonato (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Sulfato (mg/L)	14	> 0,20	Sim
Cloreto (mg/L)	14	>0,20	Sim
Fluoreto (mg/L)	14	<0,01	Não
Nitrato (mg/L N)	14	>0,20	Sim
Ferro (mg/L)	14	< 0,15	Não
Manganês (mg/L)	14	< 0,10	Não

Os resultados de pH no período úmido plotados no gráfico da Figura 7.10 revela uma distribuição muito próxima a linha de normalidade, confirmando o resultado do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.5. A Figura 7.10 mostra que os valores de pH estão concentrados no intervalo de 6,9 a 7,4. E apenas duas amostras estão fora desse intervalo.

Os resultados de CE, no período úmido, distribuídos no gráfico de probabilidade da Figura 7.11 mostram que as amostras se posicionam muito próximas da linha de normalidade. Essa feição de distribuição praticamente Normal reforça o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.5. De acordo com gráfico da Figura 7.11, as amostras estão posicionadas, principalmente, entre os valores de 800 µS/cm e 2400 µS/cm. Duas amostras mostram valores próximos a 400 µS/cm e uma amostra acima de 2600 µS/cm.

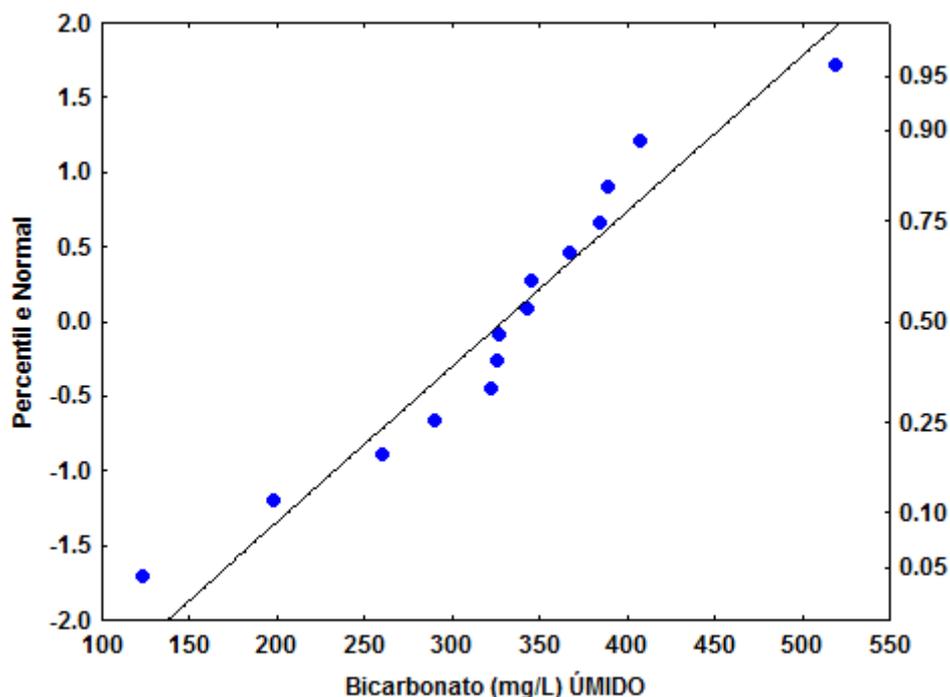


**Figura 7.10: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de pH (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**



**Figura 7.11: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de CE (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

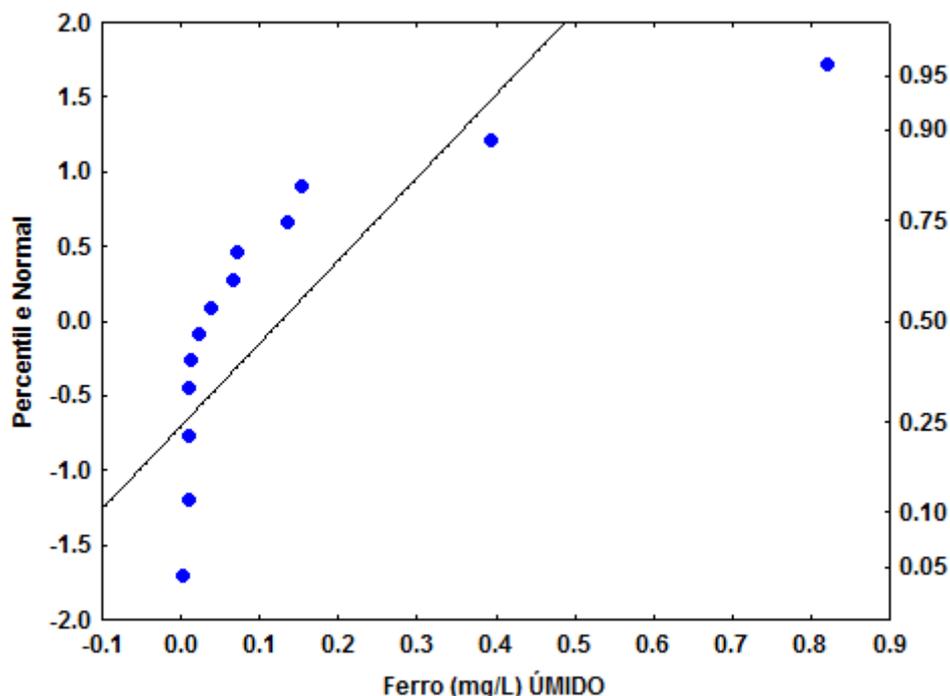
Os resultados de bicarbonato, no gráfico de probabilidade da Figura 7.12, mostram uma distribuição, em geral, próximo à linha de normalidade, com poucos e relativamente discretos desvios. Essa feição de distribuição dos resultados concordam com o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.5.



**Figura 7.12: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade de bicarbonato (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

Os resultados de ferro, no gráfico de probabilidade da Figura 7.13, mostram uma concentração de amostras com valores baixos e que fogem, por isso, da curva de normalidade. Essa distribuição justifica, então, o resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov apresentado na Tabela 7.5.

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.



**Figura 7.13: Teste de Kolmogorov-Smirnov. Gráfico de probabilidade do ferro (período úmido). Escala vertical esquerda com valor normal esperado e escala vertical direita com valores de percentil.**

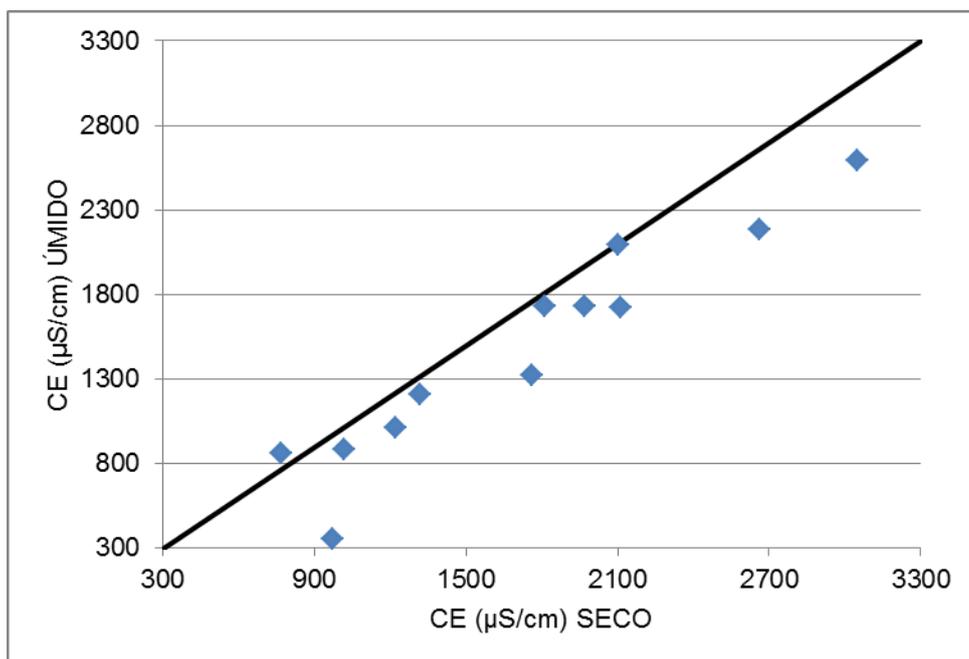
## 7.2.2 Avaliação do efeito sazonal na hidroquímica

Para avaliar a contribuição das condições climáticas na qualidade natural das águas da Bacia do Riacho do Juá foram elaborados os gráficos das Figuras 7.14 a 7.28.

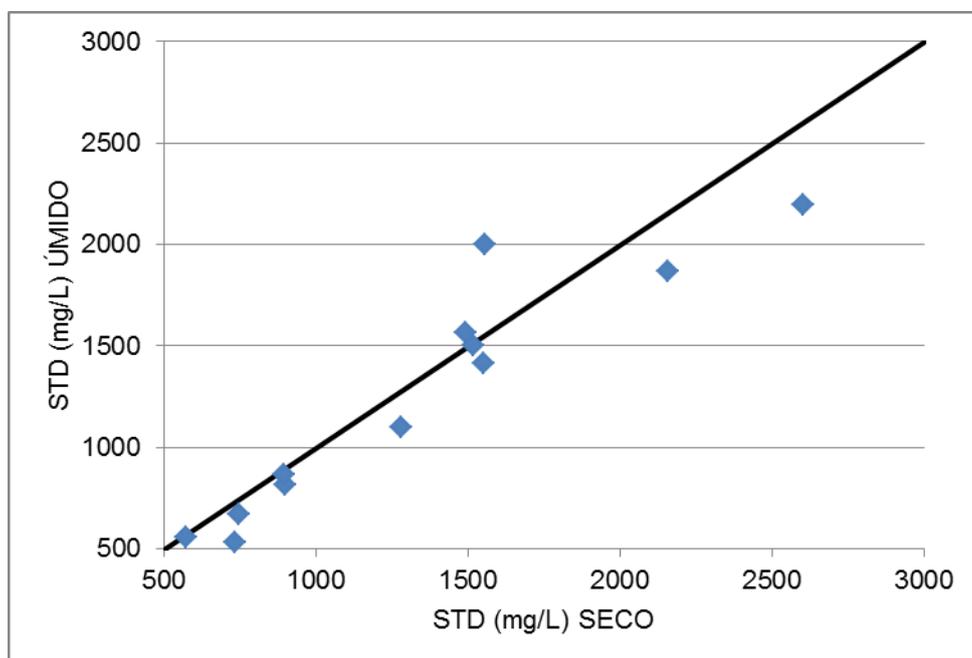
Da análise dos gráficos, têm-se as seguintes considerações:

- Os resultados analíticos para os parâmetros CE (Figura 7.14), STD (Figura 7.15), dureza (Figura 7.16), bicarbonato (Figura 7.17), magnésio (Figura 7.18), sódio (Figura 7.19) e potássio (Figura 7.20) apresentam leve tendência de elevação no período seco, quando comparado ao período úmido;
- Os resultados analíticos para os parâmetros pH (Figura 7.21) e fluoreto (Figura 7.22) apresentam leve tendência de elevação (no caso do pH, tendência de ser mais alcalino) no período úmido;
- Os parâmetros sulfato (Figura 7.23), cloreto (Figura 7.24) e nitrato (Figura 7.25) não apresentam nenhuma tendência clara de resposta ao efeito sazonal, já que parte dos seus resultados analíticos é superior no período seco e parte é superior no período úmido ou tende a se posicionar na linha de igual valor;
- Os resultados mais baixos de cálcio não mostram tendência de crescimento nos períodos, mas para os teores mais altos (> 200 mg/L) indica um crescimento no período seco (Figura 7.26).

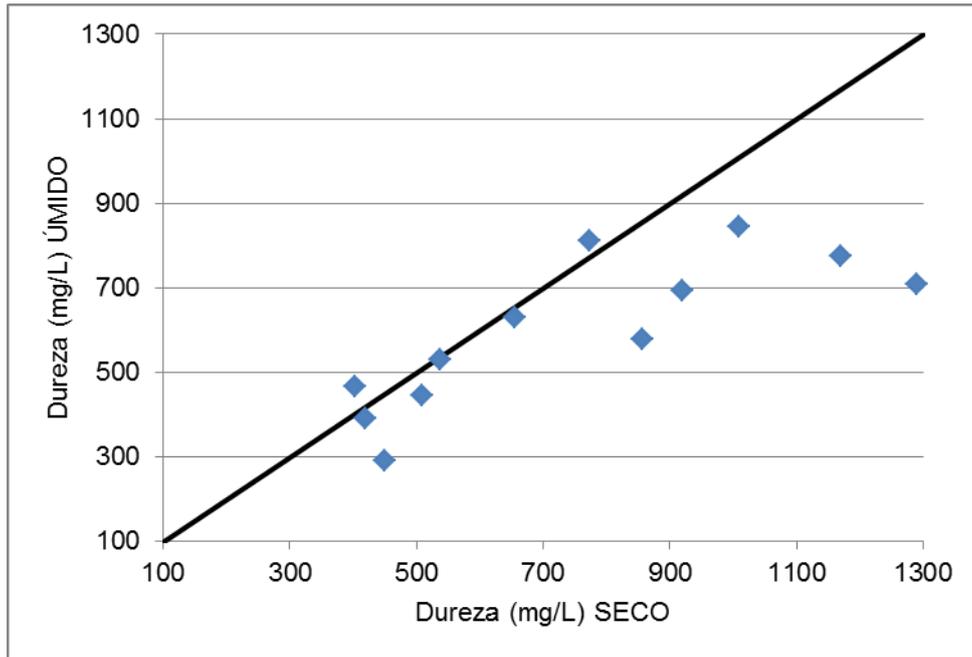
Para os parâmetros nitrito, amônia, ferro e manganês não foram realizadas essas avaliações porque a maior parte dos resultados analíticos em ambos os períodos amostrais foram abaixo do LD.



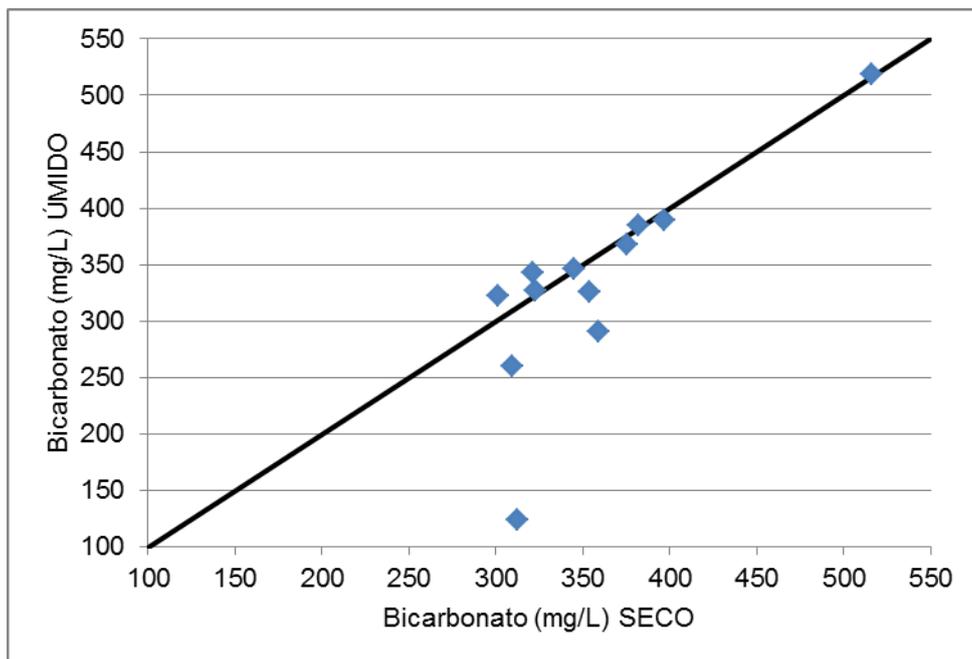
**Figura 7.14: Comparação dos resultados de CE ( $\mu\text{S/cm}$ ) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



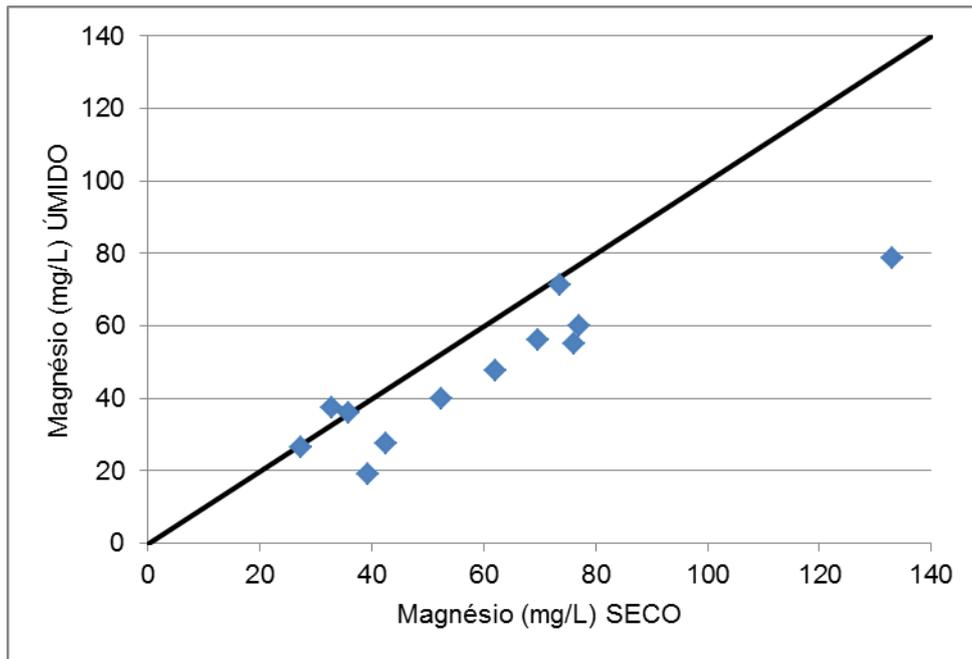
**Figura 7.15: Comparação dos resultados de STD ( $\text{mg/L}$ ) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá.**



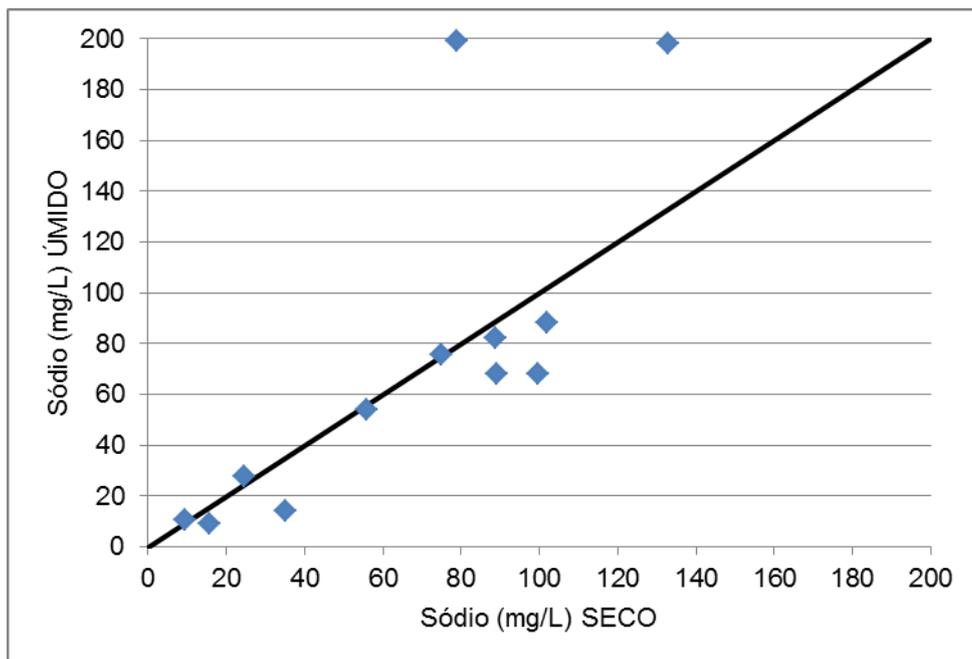
**Figura 7.16: Comparação dos resultados de dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



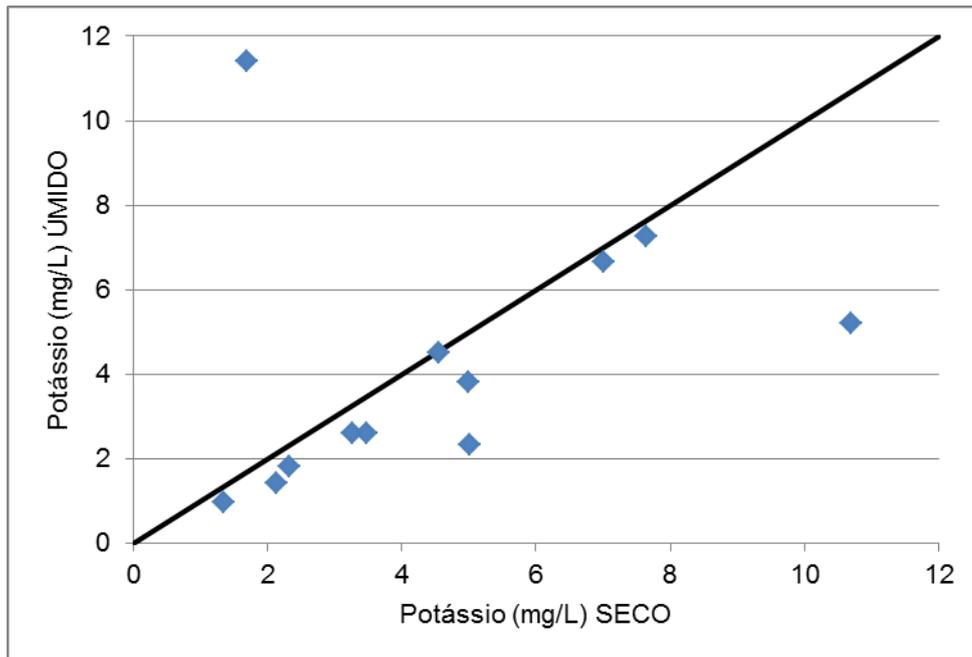
**Figura 7.17: Comparação dos resultados de bicarbonato (mg/L CaCO<sub>3</sub>) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



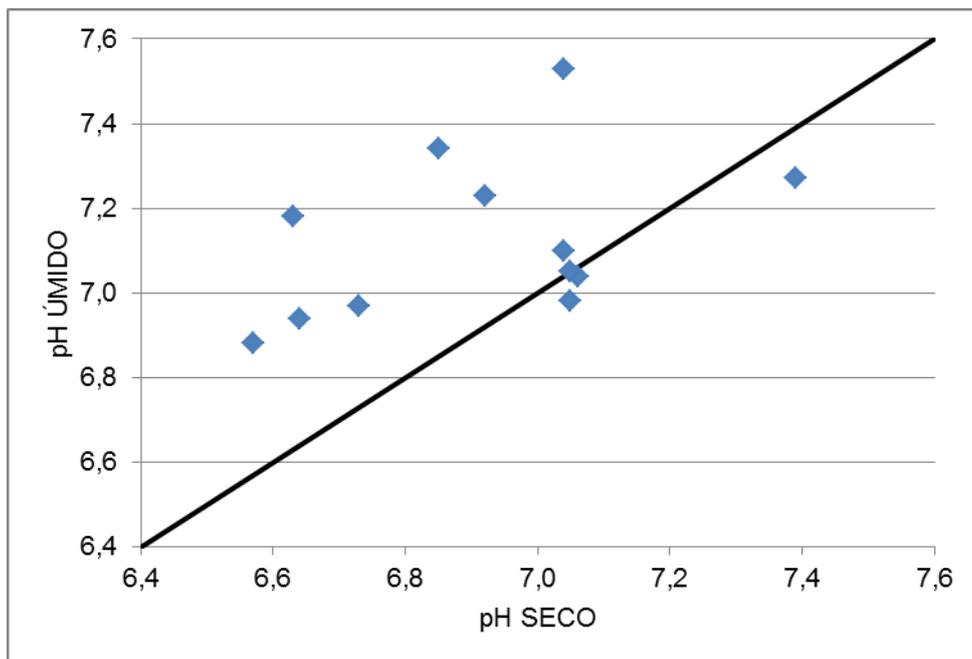
**Figura 7.18: Comparação dos resultados de magnésio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



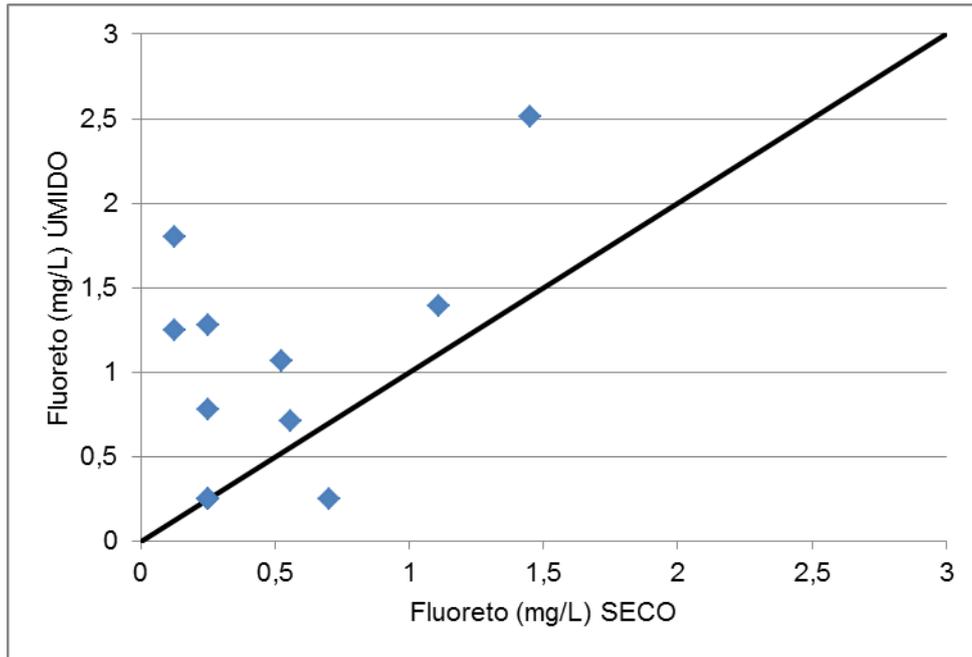
**Figura 7.19: Comparação dos resultados de sódio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



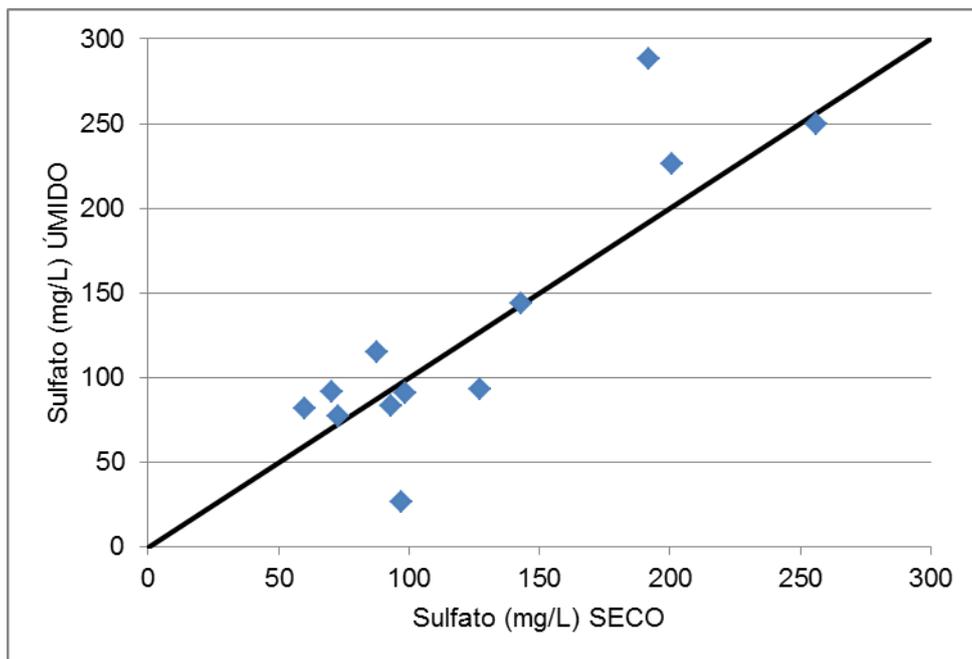
**Figura 7.20: Comparação dos resultados de potássio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



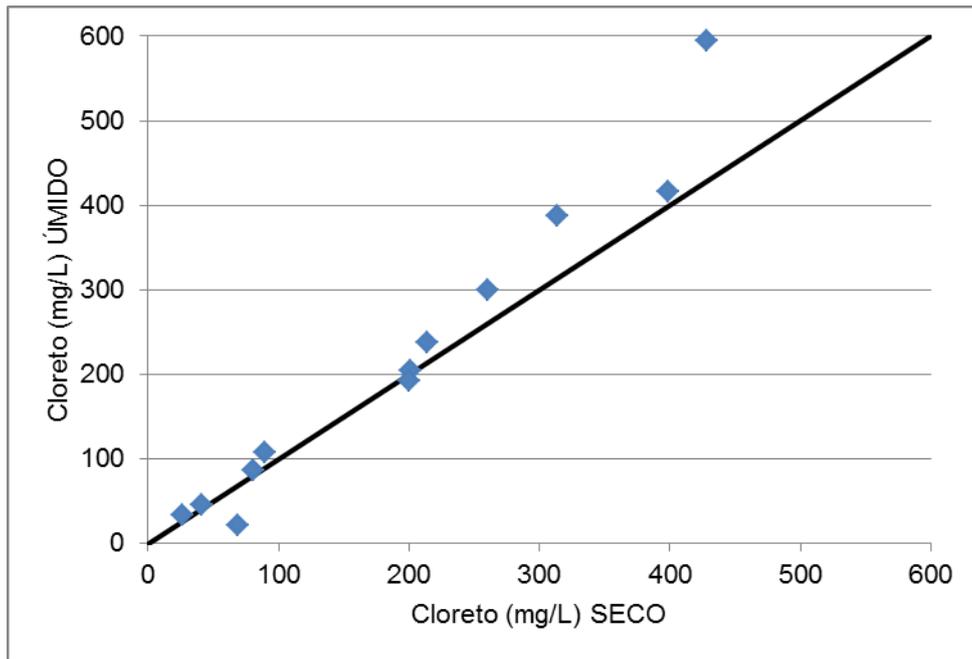
**Figura 7.21: Comparação dos resultados de pH obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá.**



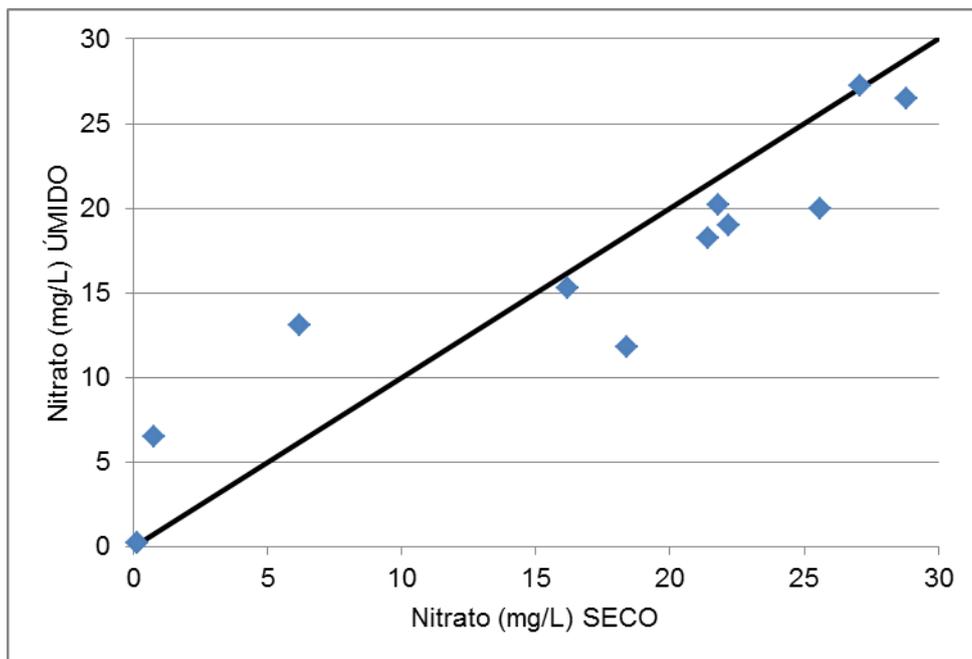
**Figura 7.22: Comparação dos resultados de fluoreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



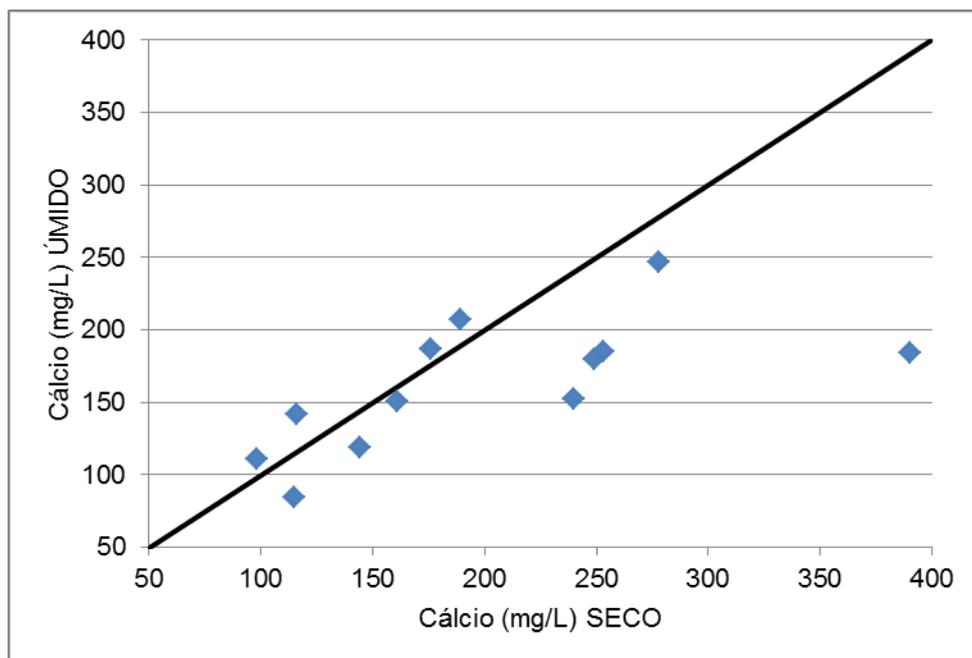
**Figura 7.23: Comparação dos resultados de sulfato (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá.**



**Figura 7.24: Comparação dos resultados de cloreto (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na bacia do Riacho do Juá.**



**Figura 7.25: Comparação dos resultados de nitrato (mg/L N) obtidos na amostragem representativa do período seco (1° campanha) e úmido (2° campanha) na Bacia do Riacho do Juá.**



**Figura 7.26: Comparação dos resultados de cálcio (mg/L) obtidos na amostragem representativa do período seco (1ª campanha) e úmido (2ª campanha) na bacia do Riacho do Juá.**

### 7.3 Avaliação hidrogeoquímica

Na avaliação hidrogeoquímica das amostras de água subterrânea da Bacia do Riacho do Juá foi realizada, primeiramente, uma análise dos perfis litológicos e construtivos dos poços amostrados. De acordo com essa análise, os poços amostrados mostram características hidrogeológicas semelhantes dentro de um contexto cárstico, podendo ser agrupado em um único grupo.

A caracterização hidrogeoquímica do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá depende da composição litológica, dos fatores climáticos - principalmente a pluviometria -, dos aspectos estruturais, dos processos de dissolução e da carstificação que na área é bem desenvolvida, a julgar pela densidade de dolinas, sumidouros e condutos existentes.

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

As características físico-químicas e químicas das águas subterrâneas possuem variações condicionadas por fatores diversos, como geológicos/hidrogeológicos e sazonalidade climática da região. Para um melhor entendimento desses fatores e da interpretação dos dados químicos analíticos das águas subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá desenvolveu-se um tratamento estatístico descritivo, com auxílio de gráficos de distribuição e de correlação.

Além dos aspectos naturais, existe outro fator relevante que deve ser considerado nessa avaliação e que está relacionado com as atividades

agrícolas na Bacia do Riacho do Juá, intensificadas nos últimos anos, e que pode, de certa forma, modificar o quimismo dessas águas.

### 7.3.1 Estatística descritiva

Os sumários estatísticos das amostras de água do aquífero Salitre, coletadas nos dois períodos amostrais (seco e úmido) na Bacia do Riacho do Juá, constam nas Tabelas 7.6 e 7.7. São apresentados os valores dos parâmetros mínimo, máximo, médias, medianas, desvio padrão, coeficiente de variação e amplitude. Antes de utilizar a estatística descritiva realizou-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, através do programa Statistica 7.0, para todas as amostras, sendo estas separadas por período de coleta (ver o subitem 7.2.1).

O teste Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para verificar a distribuição dos parâmetros químicos e físico-químicos analisados e assim definir se os dados seriam representados por média e desvio padrão se as amostras mostrassem uma distribuição normal, enquanto que para as variáveis, com distribuição não normal, seriam representados por medianas e pelos valores extremos da distribuição dos dados, o mínimo e o máximo.

O teste Kolmogorov-Smirnov mostrou que a maioria dos parâmetros analisados apresenta uma distribuição normal ou próxima da normalidade, comprovada também através da análise dos gráficos. É provável que seja um indicativo de certa uniformidade litológica, traduzido em uma mesma população geoquímica. A seguir será analisado cada parâmetro químico e físico-químico para verificar e definir os comportamentos hidrogeoquímicos das águas subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá, dentro de um contexto sazonal e espacial.

As amostras de águas dos poços inseridas no aquífero Salitre apresentam como característica principal uma mineralização expressiva, típica de aquíferos cársticos. Todos os valores encontrados para condutividade elétrica, nos dois períodos de coleta, foram superiores a 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No período seco os valores da condutividade elétrica variaram de 770 a 3050  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com média de 1709,38  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 674,17  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabela 7.6). No período úmido, Tabela 7.7, ocorreu uma leve diminuição da mineralização dessas águas, com valores variando de 350 a 2590  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , média de 1458,46  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 622,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A Figura 7.27 ilustra os valores de condutividade elétrica medidos em cada amostra nos dois períodos amostrais (seco e úmido). Verifica-se que praticamente todas as amostras, com exceção apenas da amostra C-038, apresenta os valores mais altos de CE no período seco. É no período seco, portanto, que o teor em sais minerais dissolvidos na água é mais elevado porque a circulação da água é mais lenta o que favorece a interação água/rocha, contribuindo para o enriquecimento dessas águas.

O comportamento do STD nas águas dos poços da região da Bacia do Riacho do Juá, é semelhante de CE, mostrando, valores levemente mais altos no período seco (média de 1329,69 mg/L) em relação ao período úmido (média de 1241,08) (Tabela 7.6 e 7.7). A Figura 7.28 mostra os teores de STD medidos em cada amostra nos dois períodos amostral (seco e úmido). Nota-se que os maiores teores de STD estão nas amostras de águas coletadas no

período seco, com exceção de duas amostras (C-035 e C-041) que mostram valores mais elevados no período úmido.

As Figuras 7.29 e 7.30 apresentam a distribuição dos valores de Sólidos Dissolvidos Totais na região. Observa-se que tanto no período seco quanto no úmido, os teores maiores do que 2000 mg/L estão situados na parte oeste da área e são, portanto, águas classificadas como ligeiramente salobras. Os teores entre 2000 mg/L a 1000 mg/L, são de águas também ligeiramente salobras, estando posicionadas na porção central da área. Enquanto que as águas doces, com os teores menores do que 1000 mg/L, estão localizadas principalmente na porção leste. Estes resultados mostram uma tendência de enriquecimento destas águas de leste para oeste. Ressalta-se, também, que na parte leste-norte na região de Lapão, principalmente, ocorre uma expressiva carstificação associado com falhamentos que certamente aceleram a infiltração de águas pluviométricas, podendo estar contribuído com a diluição dessas águas no período úmido (P-031, P-032, P-033, C-042, por exemplo).

**Tabelas 7.6 – Sumário estatístico das águas do aquífero Salitre coletadas no período seco (n=13) na Bacia do Riacho do Juá.**

	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
pH	6,57	7,39	6,92	7	0,23	3,33	0,82
T (°C)	25	27,1	25,85	25,9	0,62	2,41	2,1
CE (µS/cm)	770	3050	1709,38	1760	674,16	39,44	2280
ORP (mV)	-114,6	238,5	116,53	142	86,68	74,38	353,1
STD (mg/L)	573	2602	1329,69	1288	585,88	44,06	2029
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	403	1290	733,08	655	295,96	40,37	887
Cálcio (mg/L)	97,9	390	197,15	176	82,19	41,69	292,1
Magnésio (mg/L)	27,4	133	58,38	52,3	28,63	49,04	105,6
Sódio (mg/L)	9,54	133	65,12	75	38,13	58,55	123,46
Potássio (mg/L)	1,34	10,7	4,31	3,48	2,77	64,32	9,36
Bicarbonato (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	299	516	353,31	345	58,52	16,56	217
Sulfato (mg/L)	56,3	256	119,58	97	61,88	51,75	199,7
Cloreto (mg/L)	25,8	428	192,25	200	131,44	68,37	402,2
Fluoreto (mg/L)	0,13	1,45	0,47	0,25	0,40	86,25	1,33
Nitrato (mg/L N)	0,15	31,5	16,94	21,4	11,35	66,97	31,35
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,047	0,01	0,01	0,01	79,88	0,04
Amônia (mg/L NH <sub>3</sub> )	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0
Ferro (mg/L)	0,04	1,97	0,30	0,14	0,52	176,52	1,93
Manganês (mg/L)	0,00	0,04	0,01	0,00	0,01	143,14	0,05

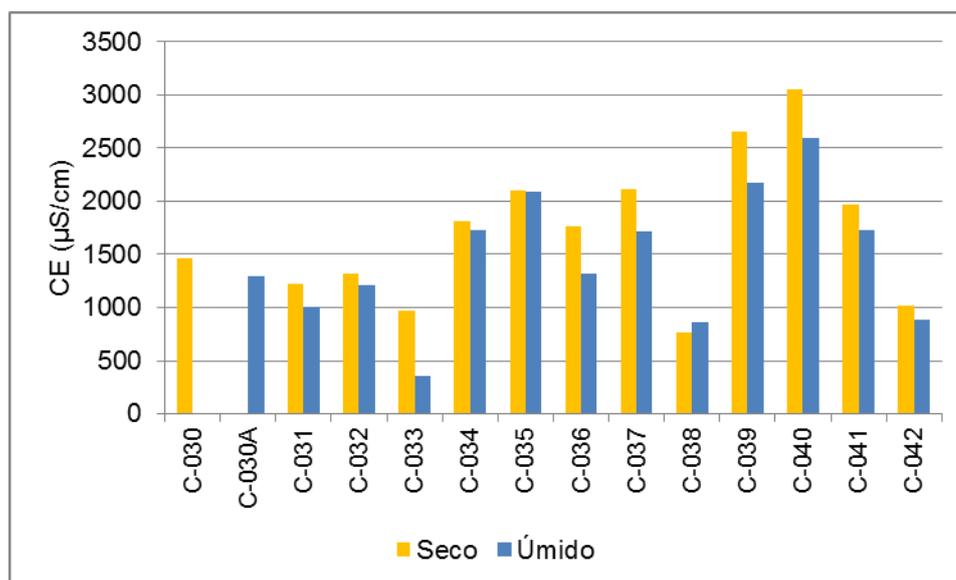
Nota: n=número de amostras. DP=Desvio Padrão. CV=Coefficiente de Variação

**Tabelas 7.7 – Sumário estatístico das águas do aquífero Salitre coletadas no período úmido (n=13) na Bacia do Riacho do Juá.**

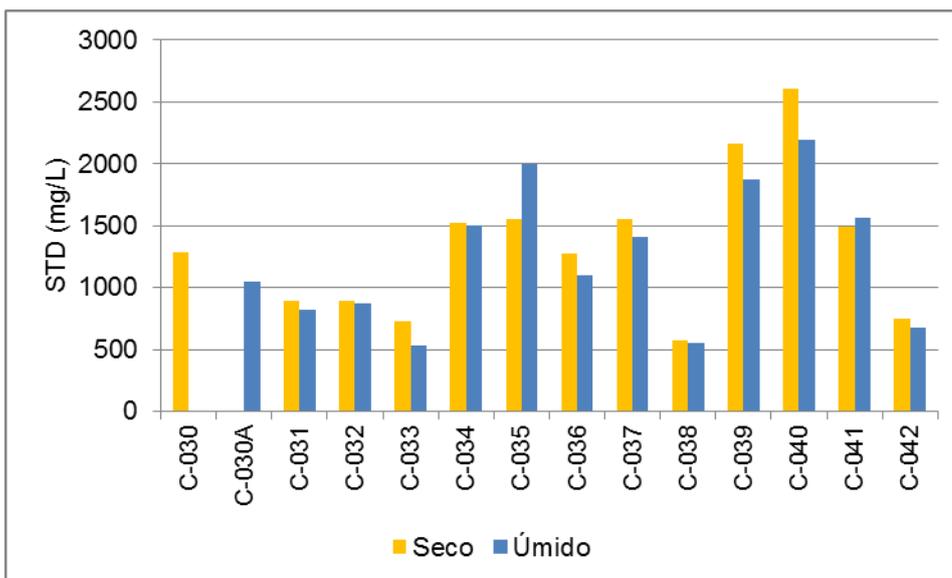
	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV	Amplitude
--	--------	--------	-------	---------	----	----	-----------

pH	6,88	7,53	7,11	7,05	0,19	2,72	0,65
T (°C)	25	26,7	25,13	25	0,47	1,88	1,7
CE (µS/cm)	350	2590	1458,46	1320	622,33	42,67	2240
ORP (mV)	35,6	482	150,13	137,8	107,28	71,45	446,4
STD (mg/L)	530	2197	1241,08	1099	560,22	45,14	1667
Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	291	844	595,31	583	168,86	28,37	553
Cálcio (mg/L)	84,9	247	159,76	152	44,15	27,63	162,1
Magnésio (mg/L)	19,2	78,6	47,68	47,7	18,38	38,56	59,4
Sódio (mg/L)	9,03	199	72,67	68	62,09	85,44	189,97
Potássio (mg/L)	0,97	11,4	4,11	2,91	2,92	71,04	10,42
Bicarbonato (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	124	519	339,15	343	90,38	26,65	395
Sulfato (mg/L)	26,4	288	127,93	93	77,74	60,77	261,6
Cloreto (mg/L)	21,3	594	216,44	192	170,75	78,89	572,7
Fluoreto (mg/L)	0,25	2,51	0,93	0,78	0,71	76,93	2,26
Fosfato (mg/L)	0,005	0,06	0,02	0,01	0,02	84,20	0,055
Nitrato (mg/L N)	0,25	27,2	15,04	17,2	8,59	57,09	26,95
Nitrito (mg/L N)	0,01	0,13	0,02	0,01	0,03	165,83	0,12
Amônia (mg/L NH <sub>3</sub> )	0,05	0,21	0,07	0,05	0,05	69,56	0,163
Ferro (mg/L)	0,003	0,82	0,14	0,04	0,23	172,29	0,82
Manganês (mg/L)	0,0005	0,09	0,01	0,00	0,03	213,30	0,097

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



**Figura 7.27: Resultados de CE (µS/cm) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**



**Figura 7.28: Resultados de STD (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

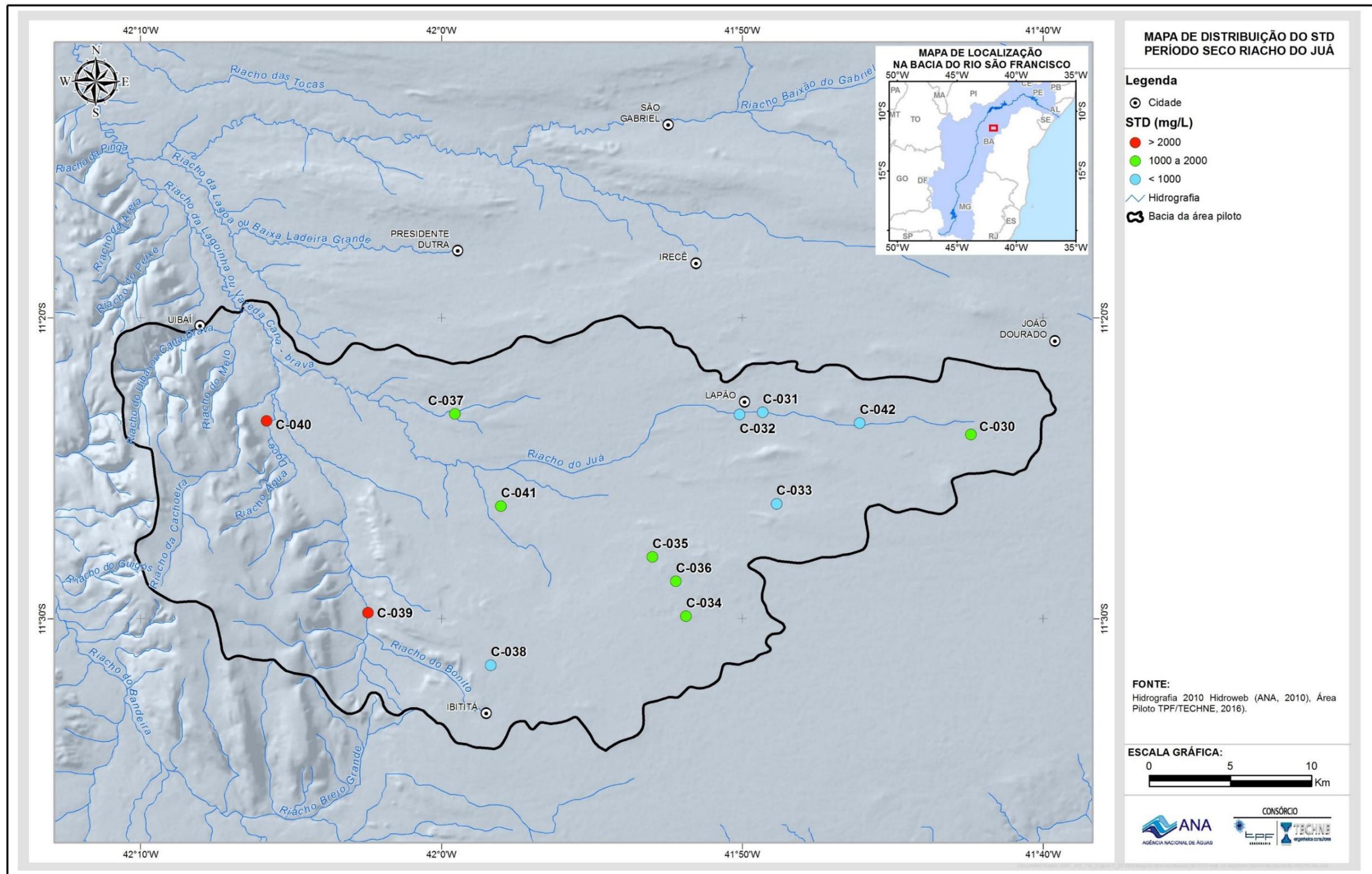
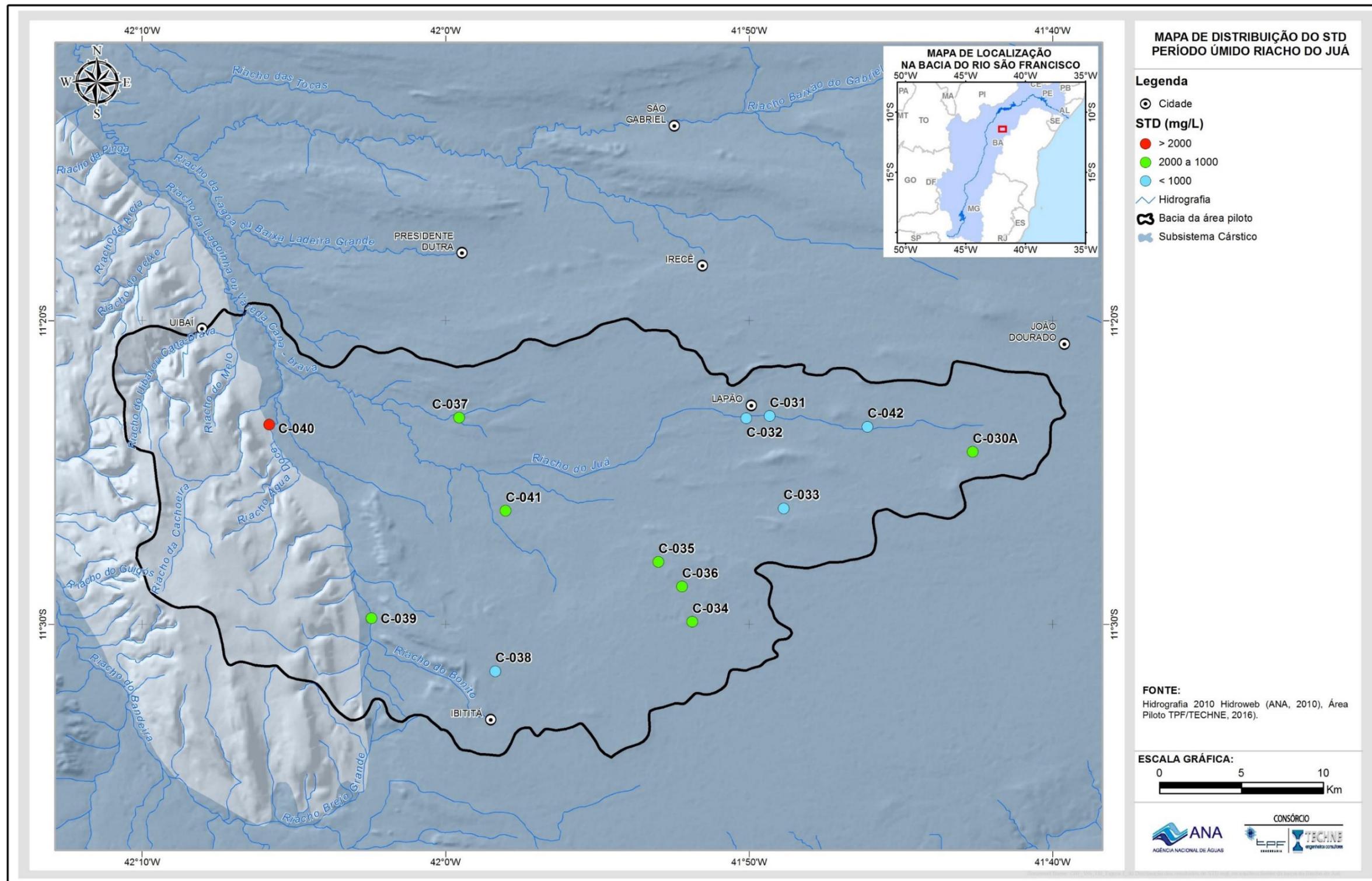


Figura 7.29: Distribuição dos resultados de STD (mg/L) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.



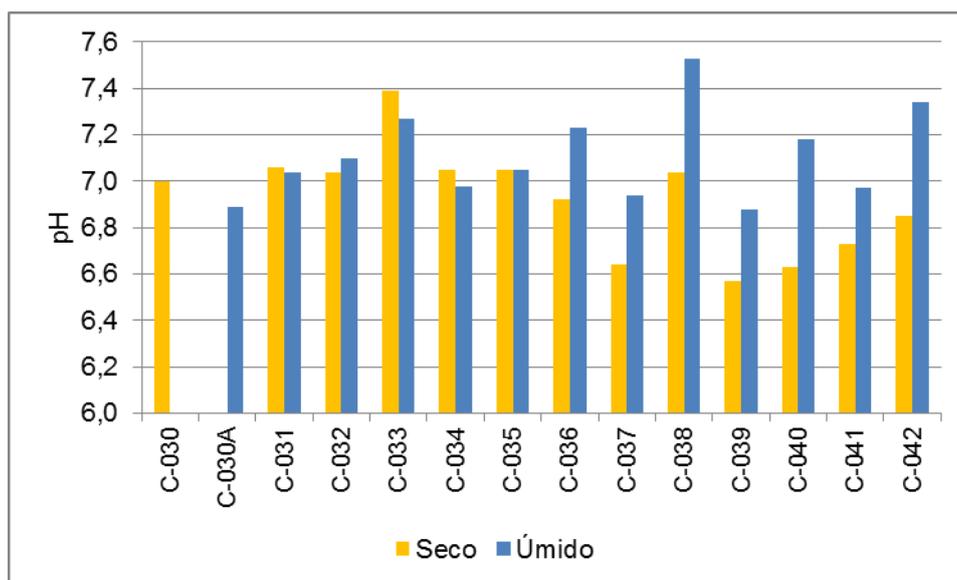
**Figura 7.30: Distribuição dos resultados de STD (mg/L) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.**

Os valores de pH nas águas do aquífero Salitre, na região da Bacia do Riacho do Juá, variaram em um intervalo de 6,57 a 7,39, com média de 6,92 no período seco, sendo indicativo de pH levemente ácido a levemente alcalino. No período úmido os valores de pH variaram de 6,88 a 7,53, com média de 7,11, demonstrando valores de pH um pouco mais elevados no período úmido, correspondendo ao período de altos índices pluviométricos da região (Tabelas 7.6 e 7.7). Isto pode ser visualizado com maior clareza quando se compara os valores de pH medidos em cada amostra, nos dois períodos de amostragem (Figura 7.31). Verifica-se que no período seco ocorre um maior número de amostras com tendência a serem levemente ácidas (C-030, C-036, C-037, C-039, C-040, C-041 e C-042). A distribuição espacial desse comportamento está ilustrada nas Figuras 7.34 e 7.35.

No mapa das Figuras 7.32 e 7.33, pode ser observada a forma com que os valores de pH estão distribuídos na região, nos dois períodos de amostragem. Parece que os valores mais baixos de pH (tendência a acidez) estão relacionados, principalmente, às variações pluviométricos sazonais locais e aos movimentos das águas do que a outros fatores.

No período úmido, caracterizados por maior índice de chuvas, as águas subterrâneas da região apresentam valores de pH levemente alcalinos devido rápida velocidade de infiltração das águas pluviométricas, favorecida por existências de fraturas e de condutos de origem cársticas, que certamente proporciona uma maior dissolução das rochas calcárias.

No período seco, na região, ocorre um comportamento contrário, ou seja, valores de pH estão levemente mais baixos. Isso leva a refletir que no período seco as águas subterrâneas estão paradas ou em movimento muito lento, diminuindo a dissolução e, conseqüentemente o CO<sub>2</sub> impõe seu efeito tampão no ambiente, proporcionando menores valores de pH em algumas amostras de água.



**Figura 7.31: Resultados de pH nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

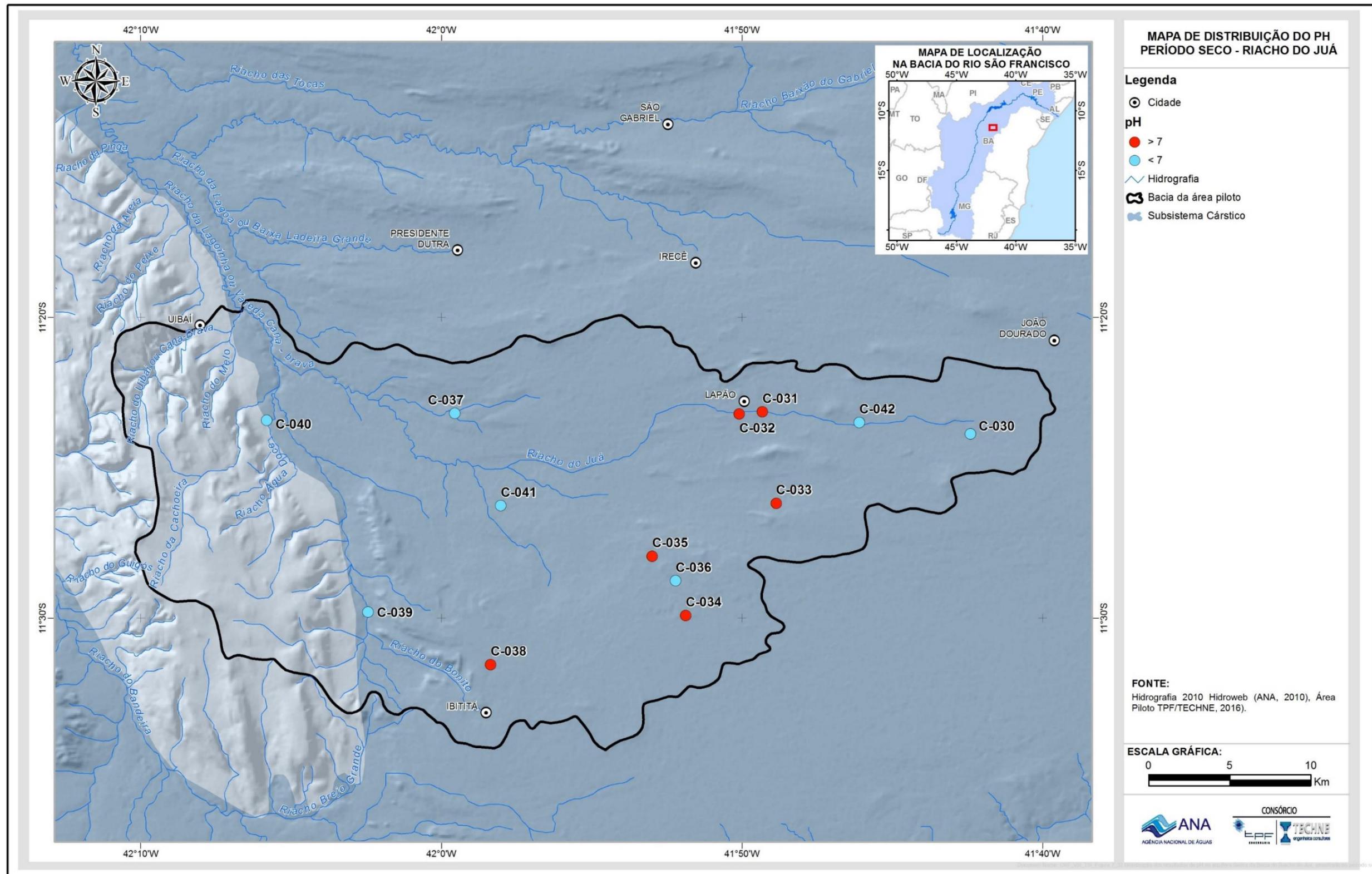


Figura 7.32: Distribuição dos resultados de pH no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

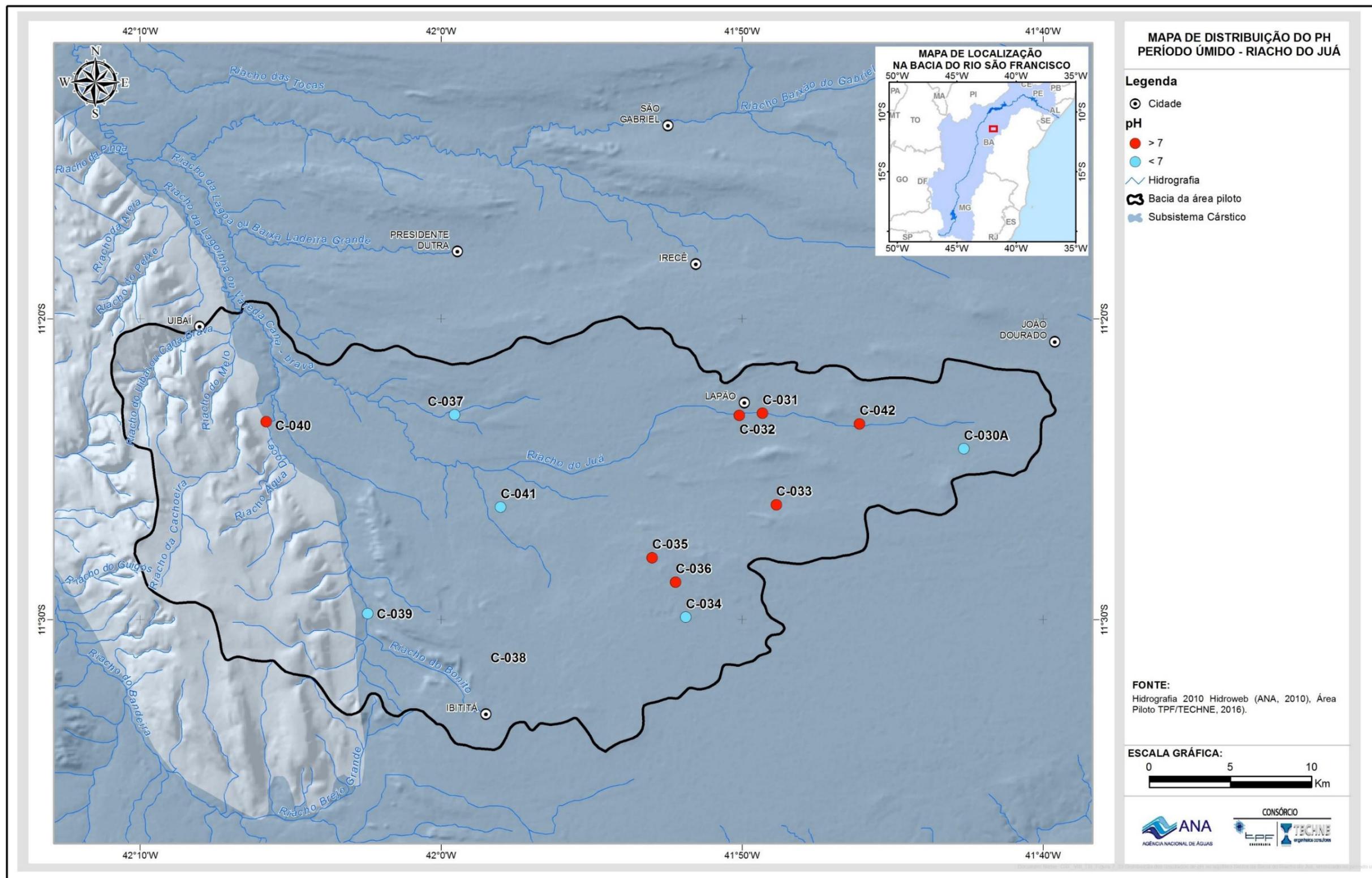
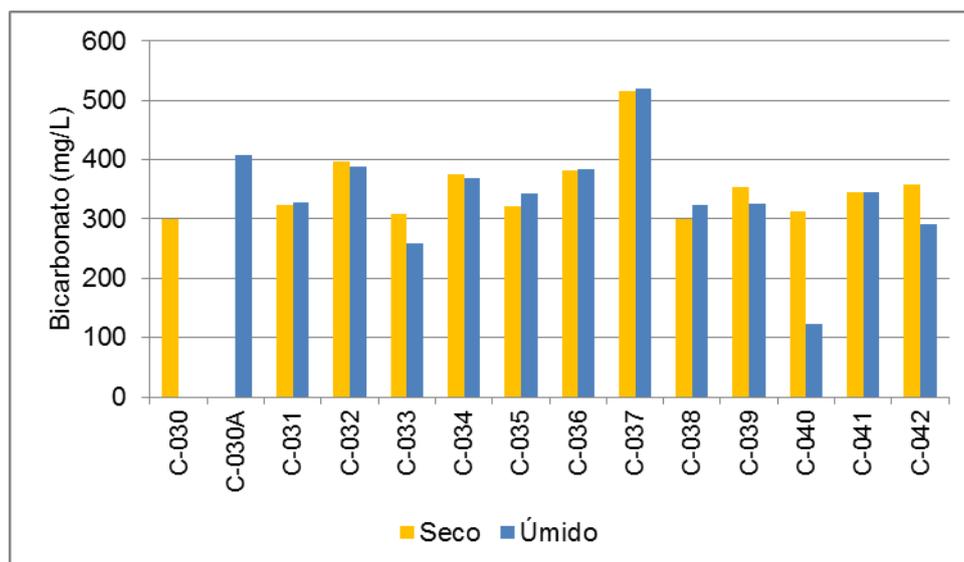


Figura 7.33: Distribuição dos resultados de pH no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.

De forma geral, independentemente do fator climático, os valores de pH levemente ácidos a neutros refletem a expressiva presença das carstificações, que proporcionam um menor tempo de trânsito e rápida circulação das água de recarga das chuvas, cujo pH é naturalmente ácido.

Com relação aos íons maiores, nas amostras subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá, o bicarbonato é o principal ânion destas águas, com concentrações variando entre 229 a 516 mg/L como CaCO<sub>3</sub> e média de 353,31 mg/L como CaCO<sub>3</sub> no período seco, e de 124 a 519,00 mg/L como CaCO<sub>3</sub> e média 339,15 mg/L como CaCO<sub>3</sub> no período úmido (Tabela 7.6 e 7.7). Os teores de bicarbonato estão compatíveis com a natureza geológica carbonática do aquífero Salitre. A Figura 7.34 mostra os teores de bicarbonatos em cada amostra nos dois períodos de amostragem (seco e úmido). Percebe-se, na comparação dos dois períodos, que não houve variações significativas dos teores de bicarbonatos, exceto para o poço C-040, localizado próximo ao contato entre os carbonatos do Grupo Una e os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina. Esse poço apresentou uma diminuição expressiva do teor de bicarbonato no período úmido, sugerindo interação entre as águas do aquífero cárstico com águas do aquífero fissural metassedimentar, nesse período.



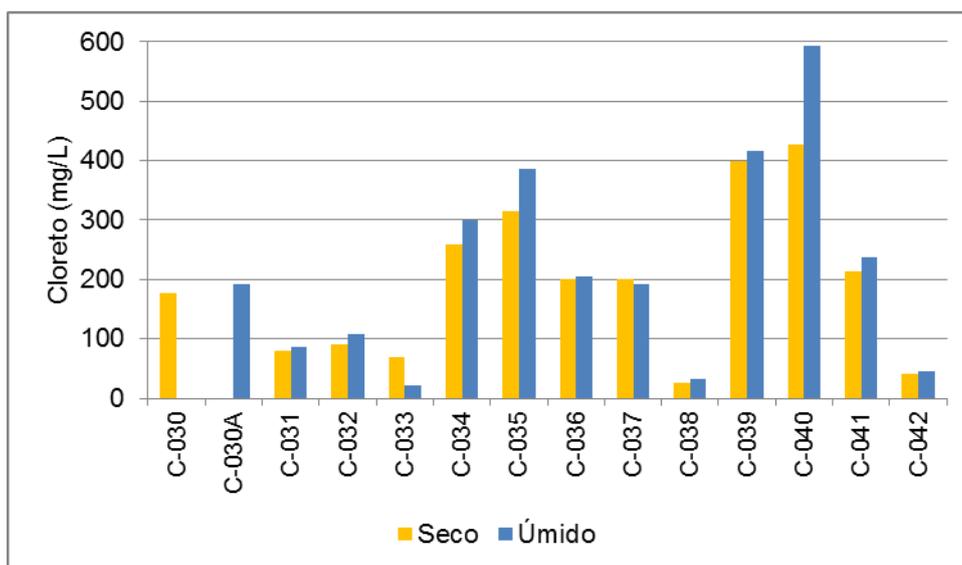
**Figura 7.34: Resultados de bicarbonato (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

Outro ânion que se destaca nas águas subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá é o cloreto, variando de 25,8 mg/L a 428 mg/L, com média de 192,25 no período seco. No período úmido, os teores variaram de 21,3 a 594 mg/L, com média de 216,44 mg/L (Tabelas 7.6 e 7.7). A Figura 7.35 mostra os teores de cloreto em cada amostra nos dois períodos de amostragem (seco e úmido). Nota-se que os teores de cloreto, na maioria das amostras, apresentam uma pequena elevação no período úmido, com exceções dos poços C-033, C-039, C-040 e C-42, que os teores crescem do período seco.

Nos mapas de distribuição de cloreto na área (Figuras 7.36 e 7.37), observa-se que, nas partes leste e norte da área, estão concentrados os teores menores do que 200 mg/L. Ao passo que os intervalos de cloreto de 200 e 300 mg/L ocorrem principalmente na porção central. Os maiores teores de cloreto (acima de 300 mg/L) se encontram na parte oeste da área, precisamente próximo ao contato entre os carbonatos do Grupo Una e os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina. Esse comportamento possivelmente está relacionado ao fluxo de água dentro do aquífero, ou seja, o fluxo principal das águas tem direção de leste para oeste da área. As isoietas de precipitação pluviometria evidenciam um aumento nas chuvas de sul para norte (Figura 7.38) e as áreas de recargas estão na porção leste. O poço C-035, situado na parte central da área, apresenta teor de cloreto acima de 300 mg/L, não seguindo, assim, a tendência geral, podendo corresponder a locais onde a circulação da água subterrâneas é deficiente ou com foco de contaminação (Guerra, 1986).

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

Assim, a presença de teores significativos de cloreto nesta água pode estar relacionada aos mecanismos climáticos, deficiência na circulação hídrica subterrânea ou ainda, a possíveis focos esparsos de contaminação (Nossa, 2011).



**Figura 7.35: Resultados de cloreto (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

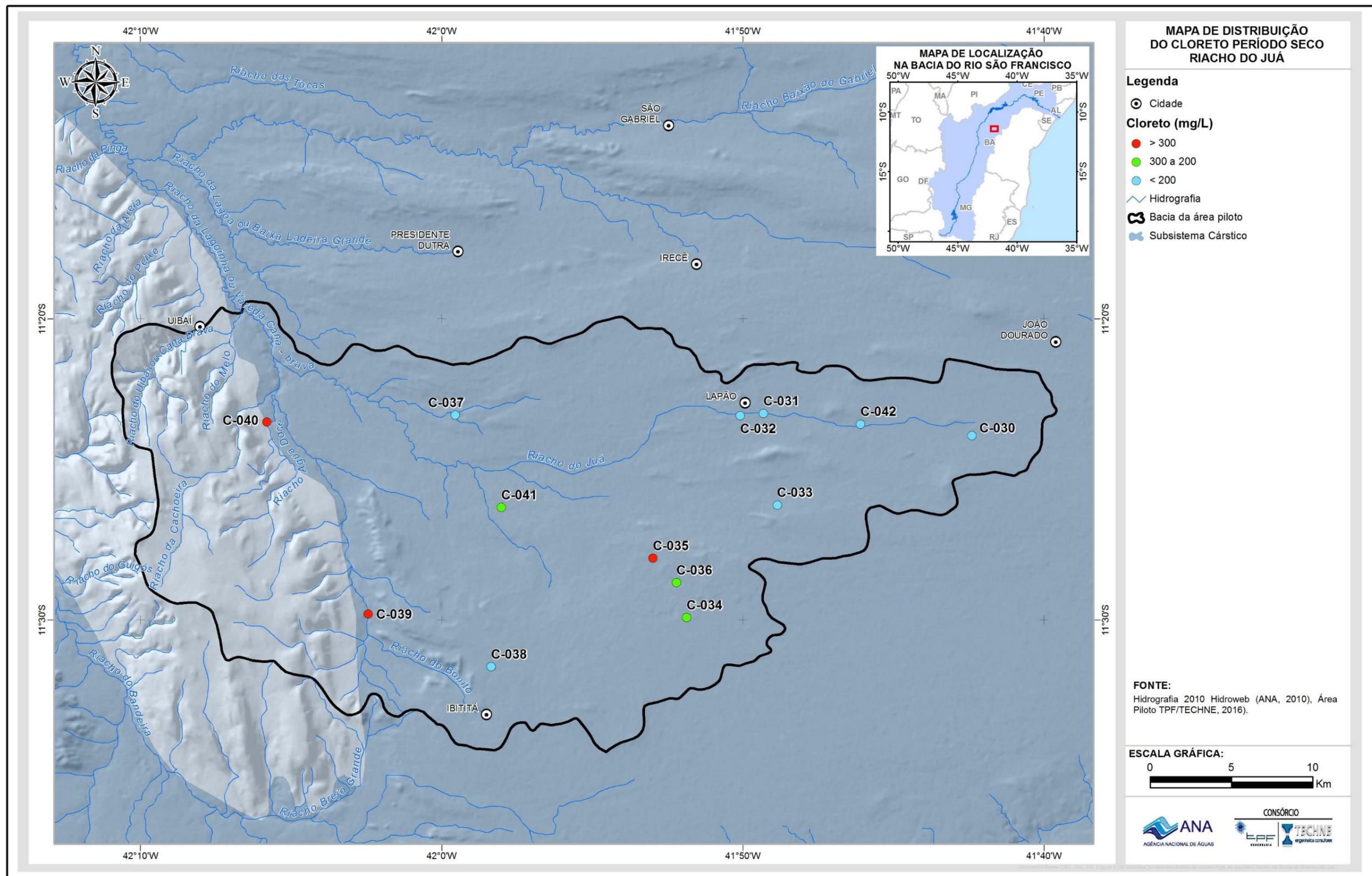


Figura 7.36: Distribuição dos resultados de cloreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

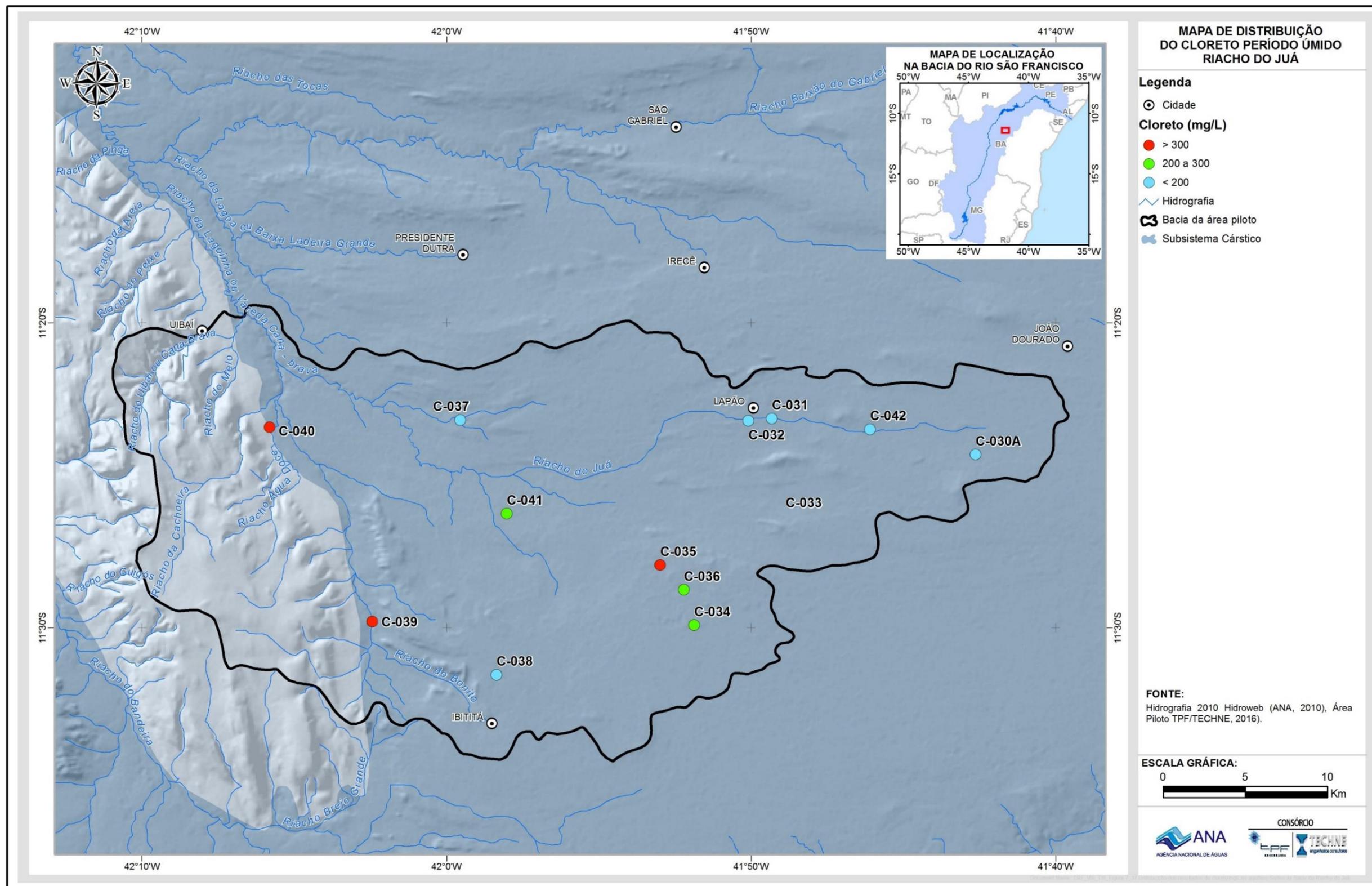


Figura 7.37: Distribuição dos resultados de cloreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.

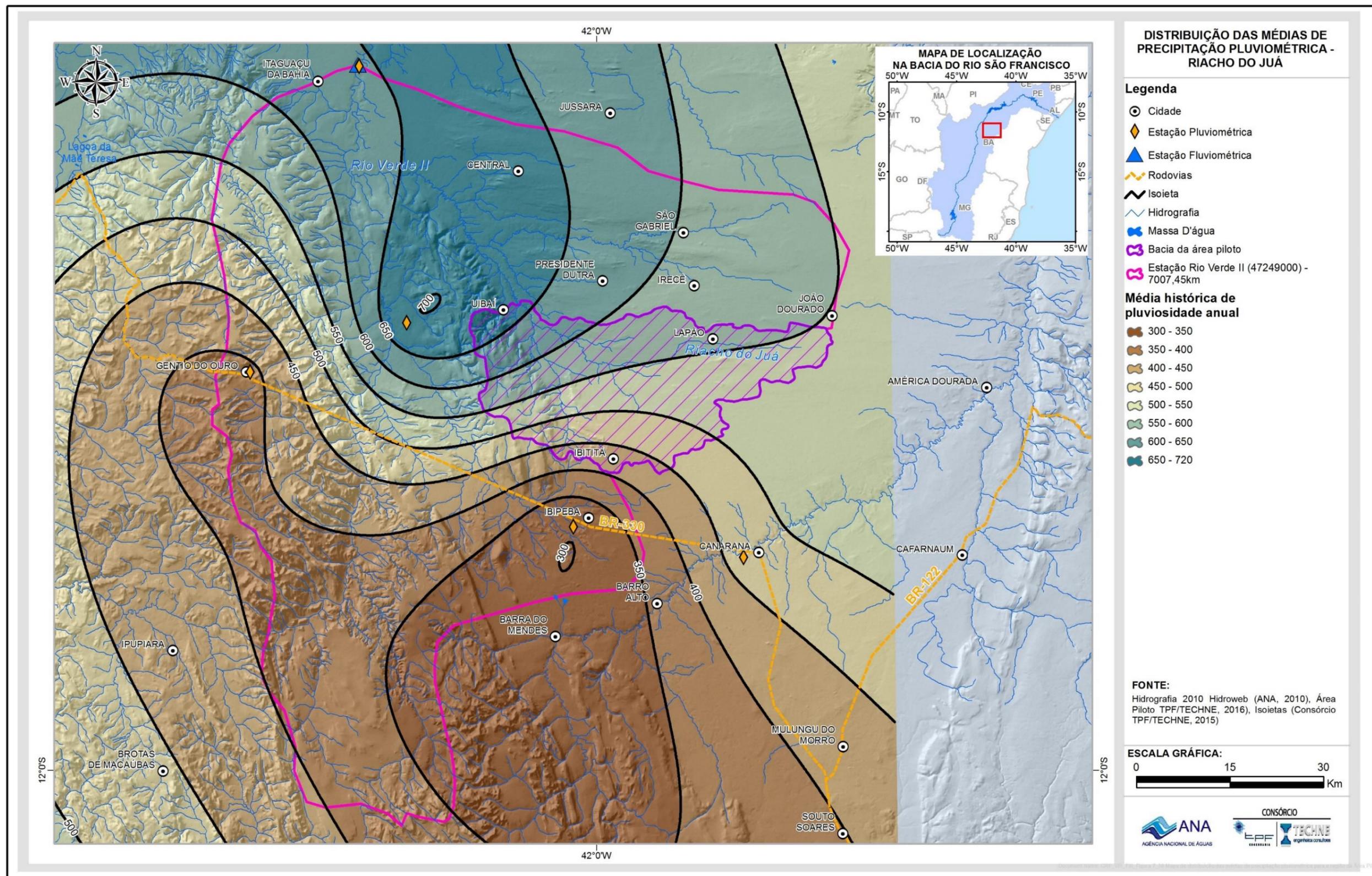
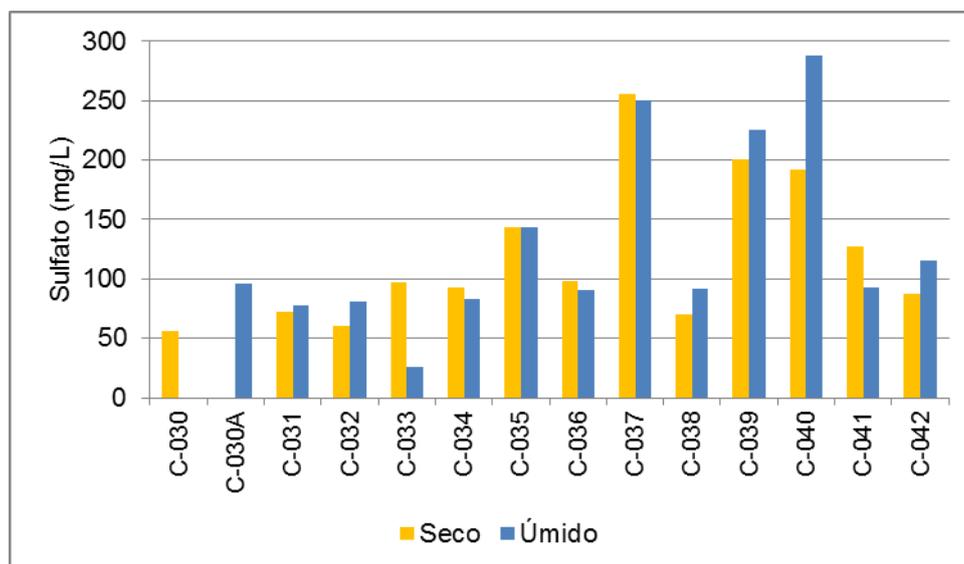


Figura 7.38: Mapa de distribuição das médias de precipitação pluviométrica para a região da Área Piloto Riacho do Juá e bacia de contribuição da estação fluviométrica Rio Verde II.

O sulfato é outro parâmetro de importância nessas águas. Este constituinte varia, no período seco, de 56,3 a 256 mg/L, com média de 119,58 mg/L, e no período úmido sua variação foi de 26,4 a 288 mg/L, com média de 127,93 mg/L (Tabelas 7.6 e 7.7). A Figura 7.39 apresenta os teores de sulfato em cada amostra nos períodos seco e úmido. Os teores das amostras, aparentemente, não estão somente condicionados aos aspectos sazonais pluviométricos, visto que parte dos teores de sulfato das amostras cresce no período seco, e outra parte cresce no período úmido.

As espacializações do sulfato na área, para os dois períodos amostrais, estão ilustradas nas Figuras 7.40 e 7.41. Pode ser observado, nos dois períodos de amostragem, que existe certo predomínio de teores de sulfato menores do que 100 mg/L na porção leste da área, com exceção do poço C-042, que teve seu teor elevado no período úmido. Na porção oeste, nas proximidades do aquífero poroso-fissural e centro norte, são encontrados os maiores teores de sulfato (> 150 mg/L).

De modo geral, o comportamento dos teores de sulfato na área se assemelha aos do cloreto, ou seja, existe certa tendência de crescimento dos teores sulfato de leste para oeste. Esse comportamento, principalmente na porção norte e leste da área, pode estar relacionado ao fluxo da Bacia do Riacho do Juá, que nasce no Povoado de Gameleira, no município de João Dourado, acompanhando um padrão E-W e tem sua foz no município de Uibaí onde se encontra com o Riacho Vereda-Cana-Brava e vai até o Município de Ibititá cujo curso acompanha a direção N-S. As concentrações mais elevadas dos sulfatos dissolvidos na água são observadas na parte oeste e centro-norte da área e estariam relacionadas à dissolução de sulfetos metálicos, principalmente pirita, disseminados nos calcários (Guerra, 1986).



**Figura 7.39: Resultados de sulfato (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

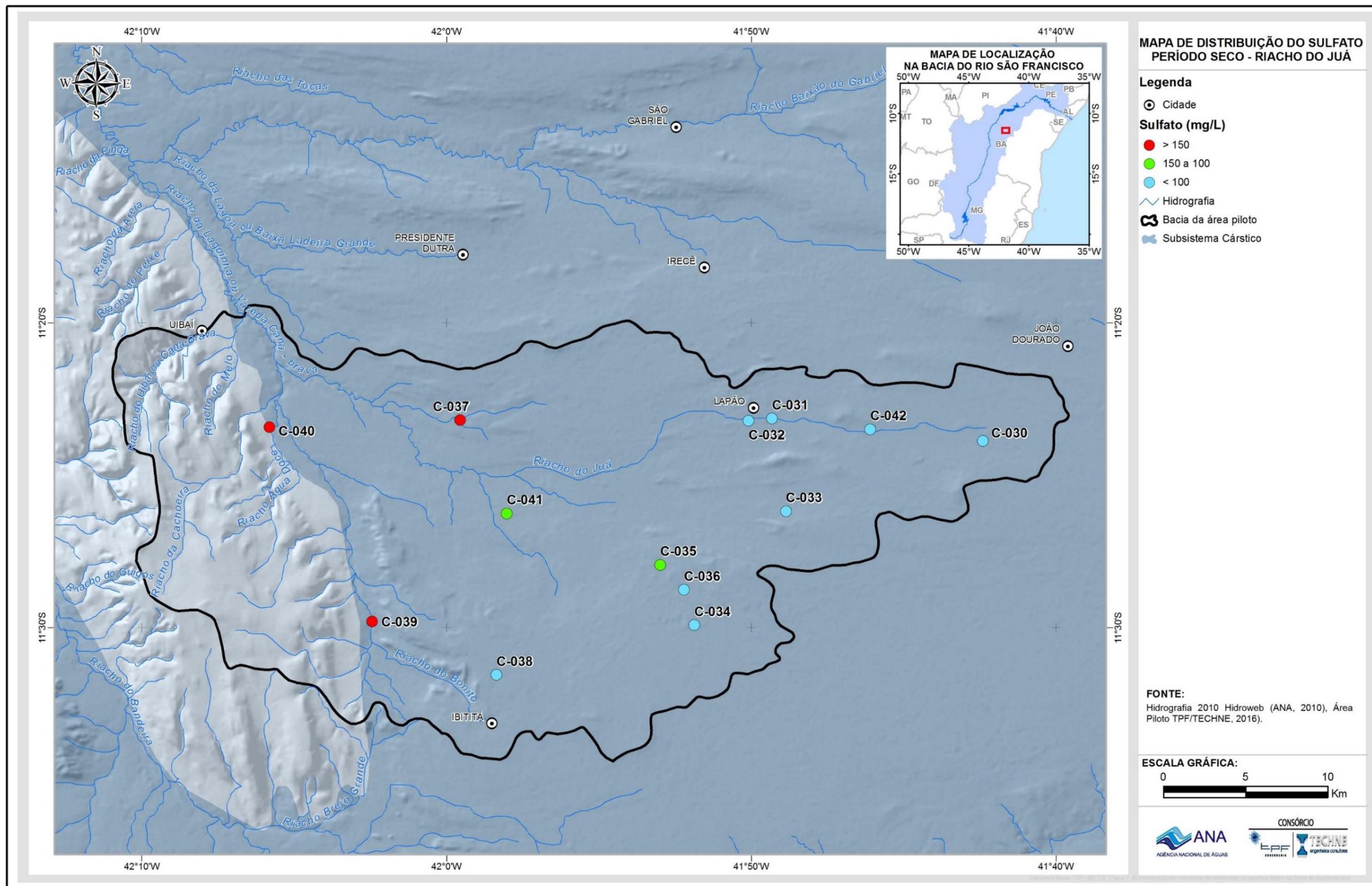


Figura 7.40: Distribuição dos resultados de sulfato (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

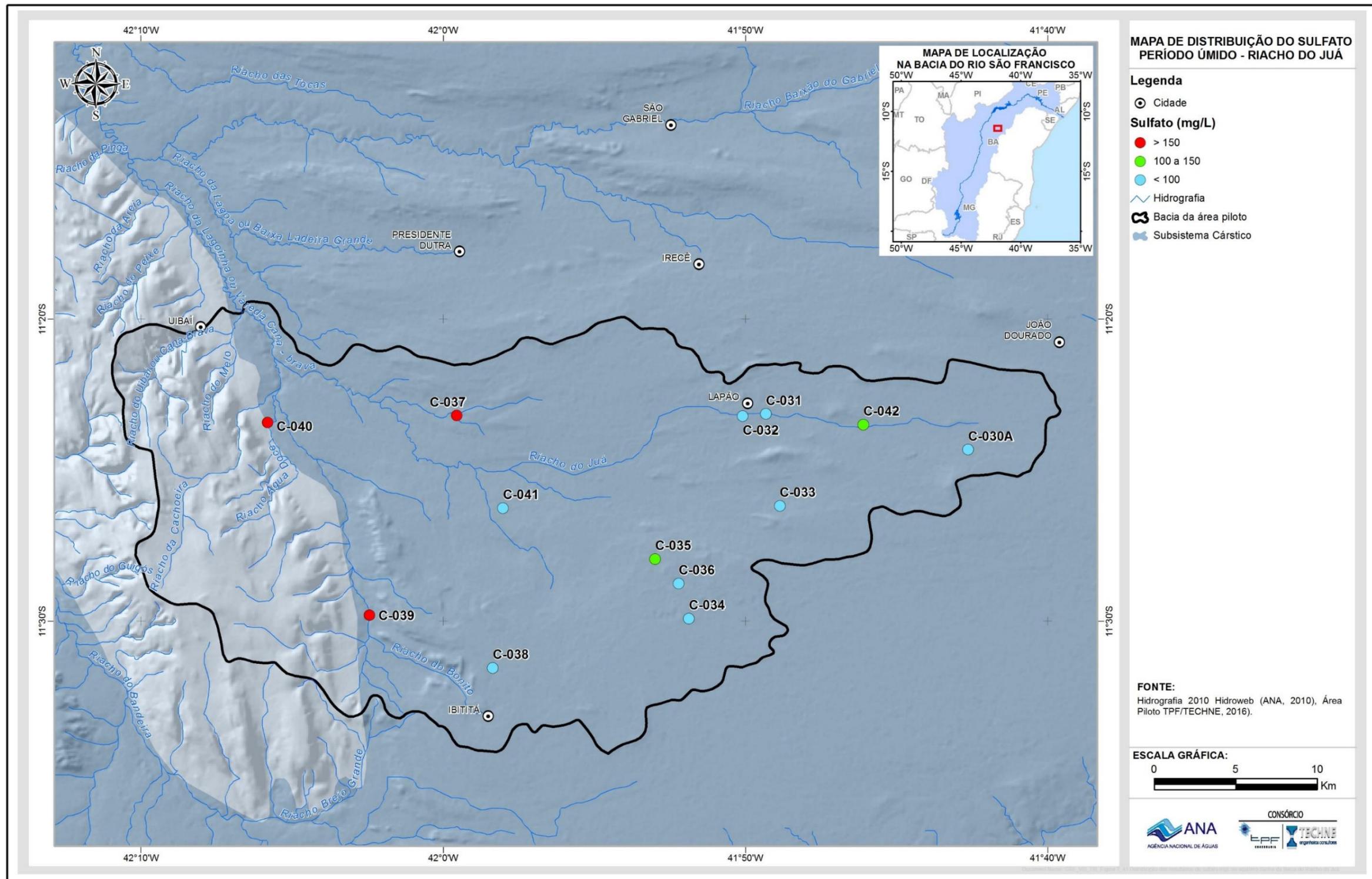
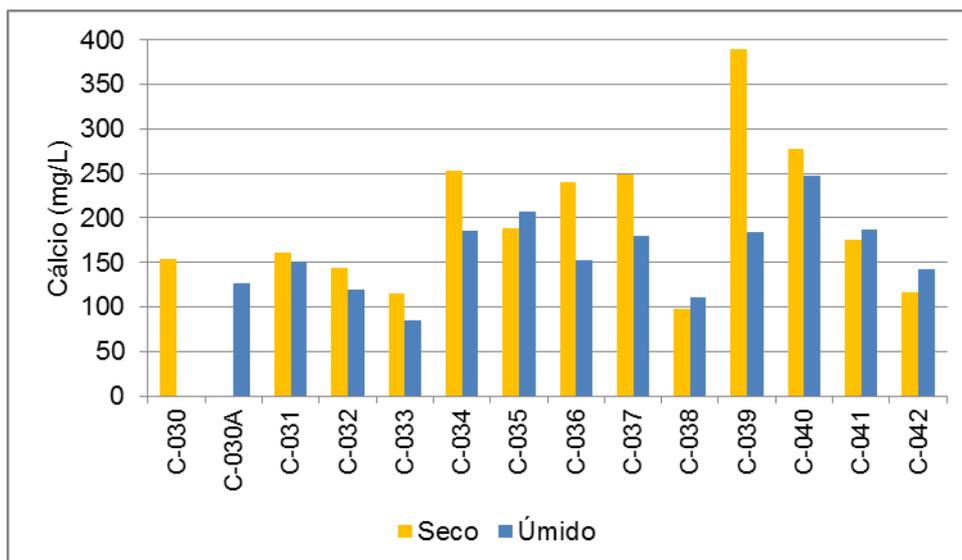


Figura 7.41: Distribuição dos resultados de sulfato (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.

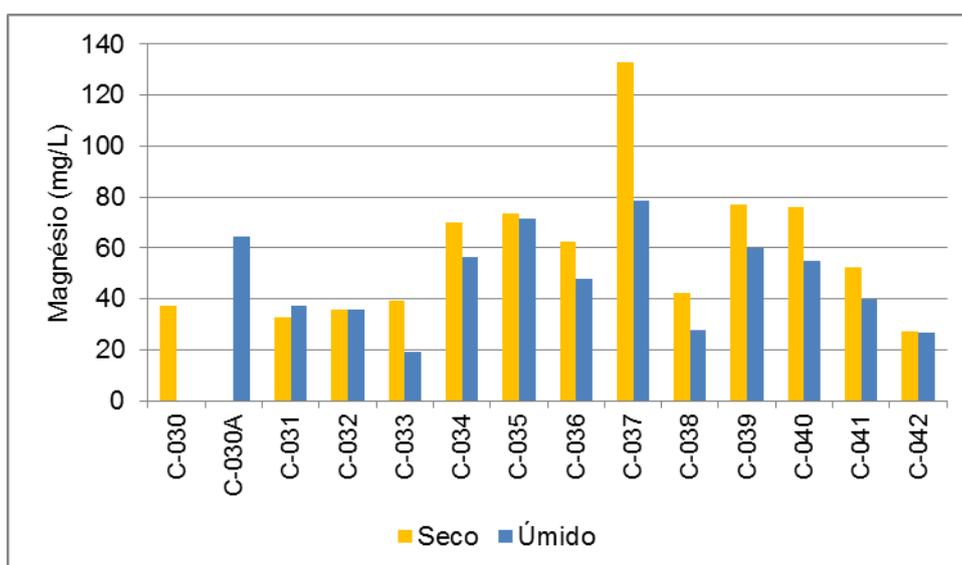
O cálcio é o cátion dominante nos dois períodos de coleta, variando de 97,3 a 390 mg/L, com média de 197,15 mg/L no período seco, e de 84,9 a 247 mg/L, com média de 159,76 mg/L para o período úmido (Tabelas 7.6 e 7.7). Os teores de cálcio dessas águas estão, certamente, relacionados à litologia calcária, típica da área da Bacia do Riacho do Juá. A Figura 7.42 ilustra os teores de cálcio em cada amostra, nos períodos seco e úmido. Para a maioria dos poços, verifica-se uma tendência de crescimento dos teores de cálcio no período seco. Parece que o aumento dos teores de cálcio, nessas águas, é controlado pelo fluxo subterrâneo (de leste para oeste), e também por processos de troca iônica, que podem ocorrer no interior do aquífero.

O magnésio é outro cátion importante para essas águas. No período seco os teores variaram de 27,4 a 133 mg/L, com média de 58,38 mg/L, e no período úmido oscilaram de 84,9 a 247 mg/L, com média de 159,76 mg/L (Tabelas 7.6 e 7.7). A Figura 7.43 ilustra os teores de magnésio em cada amostra nos períodos seco e úmido. Nota-se que em grande parte dos poços ocorre uma elevação dos teores de magnésio no período úmido. Acrescenta-se que as variações dos teores de magnésio têm, muitas vezes, uma clara relação inversa com os teores de cálcio, evidenciados, principalmente, nos poços C-031, C-032, C-033, C-034, C-039, C-040 e C-042. Nesses poços, quando o teor de cálcio aumenta ocorre um decréscimo do correspondente teor de magnésio (Figuras 7.44 e 7.45, respectivamente), caracterizando o processo de troca catiônica. Em relação ao poço C-037, situado na porção norte da área, que apresenta os maiores teores de magnésio dentre todas as amostras, parece que além do processo de troca catiônica pode estar acontecendo a dissolução de dolomita, frequente em algumas unidades da Formação Salitre.

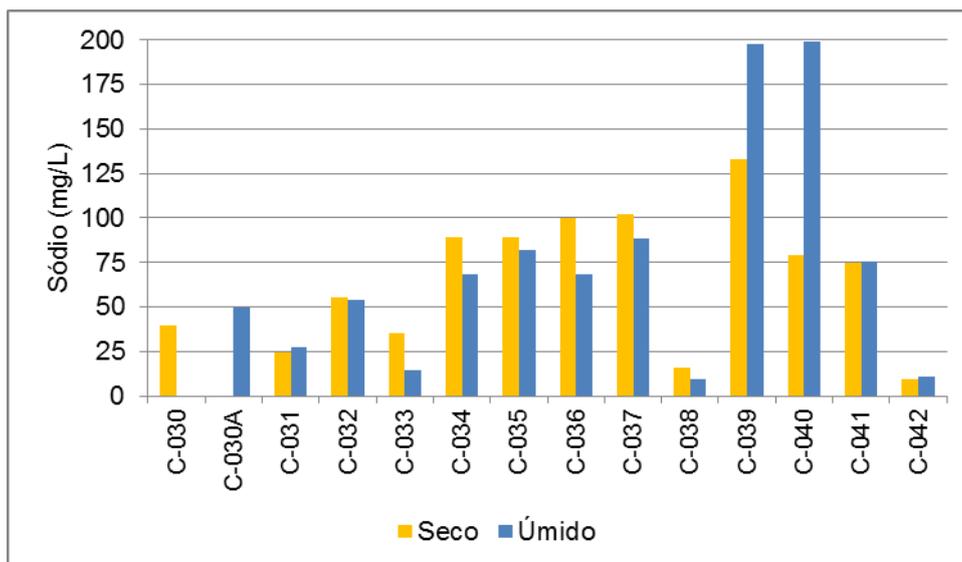
Quanto aos cátions sódio e potássio (Tabelas 7.6 e 7.7), eles estão presentes nessas águas em menores concentrações do que cálcio e magnésio. O sódio apresenta no período seco teores variando de 9,54 a 133 mg/L, com média de 65,12 mg/L e no período úmido as variações ocorreram no intervalo de 9,08 a 199 mg/L, com média de 72,67 mg/L. Já as variações de potássio, no período seco, foram de 1,34 a 10,7 mg/L, com média 4,31 mg/L e no período úmido os teores variaram de 0,97 a 11,4 mg/L, com média de 4,11 mg/L. As Figuras 7.44 e 7.45 mostram, respectivamente, os teores de sódio e potássio em cada amostra nos períodos seco e úmido. O crescimento dos teores de sódio deve estar relacionado, principalmente, ao fluxo subterrâneo (de leste para oeste). Os teores de potássio estão sempre menores do que o de sódio, provavelmente em consequência da remoção seletiva deste íon, por tocas de bases, por adsorção pelas argilas e por absorção pelos vegetais (Skikszay, 1981).



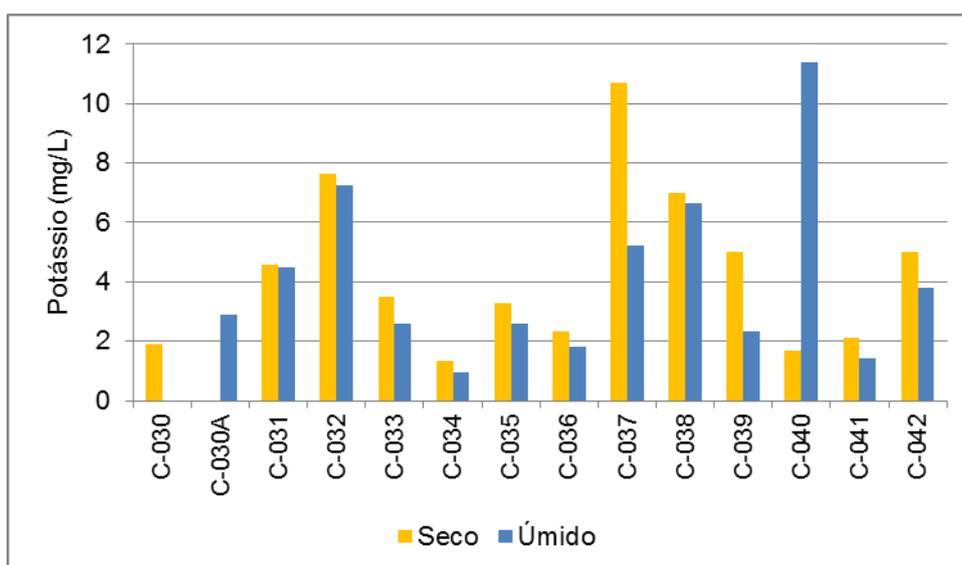
**Figura 7.42: Resultados de cálcio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**



**Figura 7.43: Resultados de magnésio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

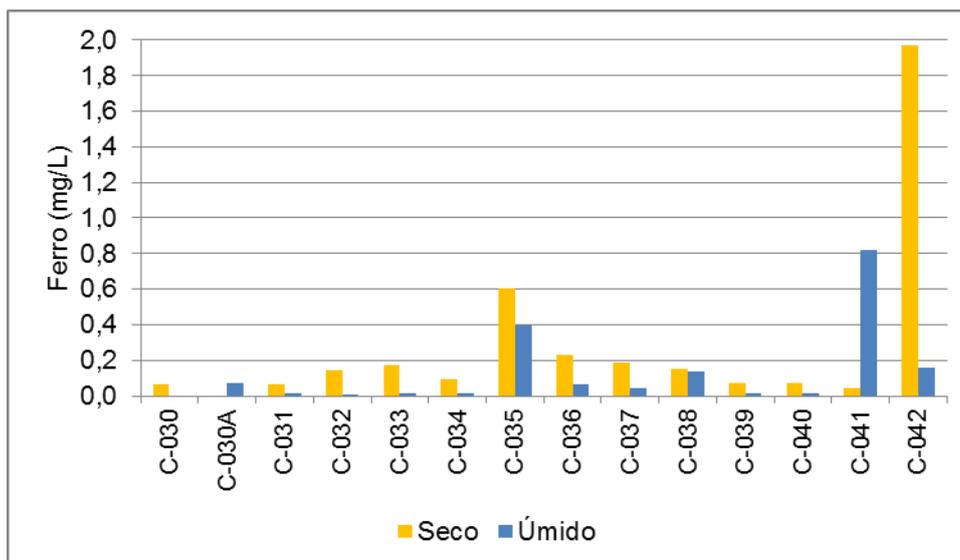


**Figura 7.44: Resultados de sódio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**



**Figura 7.45: Resultados de potássio (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

Dentre os constituintes secundários presentes nas águas subterrâneas na Bacia do Riacho do Juá, o ferro ocorre em teores maiores que o manganês (Tabelas 7.6 e 7.7). A Figura 7.46 ilustra a situação dos teores de ferro em cada amostra, nos dois períodos amostrais. Nota-se que apenas os poços C-035, C-041 e C-042 apresentam concentrações consideráveis. A presença de manganês nessas águas ocorreu apenas como traço.



**Figura 7.46: Resultados de ferro (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

Os resultados da dureza para as águas subterrâneas, na bacia do Riacho do Juá, estão apresentados nas Tabelas 7.6 e 7.7, nos períodos seco e úmido, respectivamente. No período seco, os teores da dureza variaram de 403 a 1290 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ), com média 733,08 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ). Para o período úmido, os valores da dureza variaram entre um mínimo de 291 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ) e um máximo de 844 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ), com média de 595,31mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ). Percebe-se, portanto, uma tendência de elevação dos teores da dureza no período seco, evidenciado com maior clareza quando se comparam os teores dureza em cada poço por períodos de amostragem (Figura 7.47).

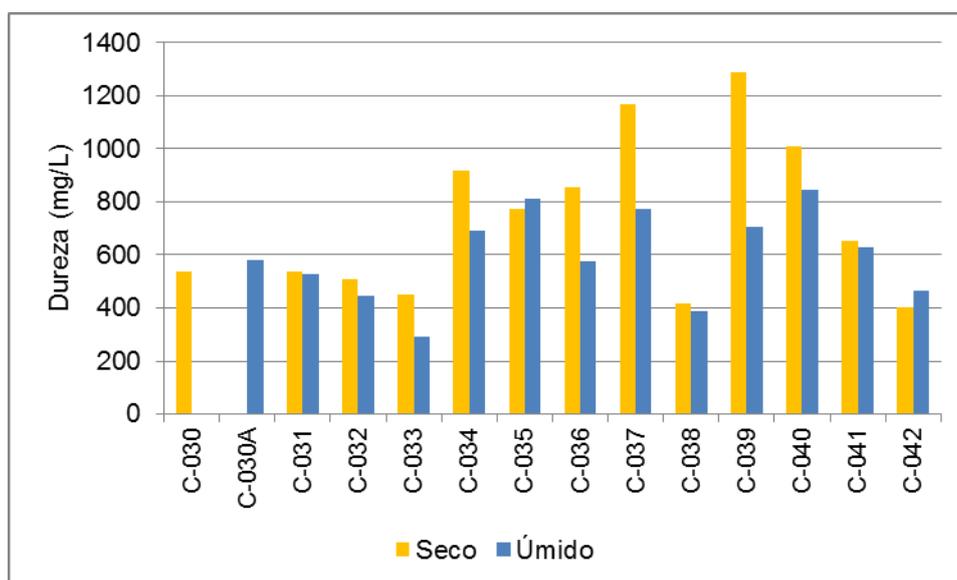
A distribuição das concentrações da dureza por períodos de amostragem está ilustrada nas Figuras 7.48 e 7.49. Observa-se que os maiores teores da dureza ocorrem nas porções oeste, central e norte da área (> 1000 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ), enquanto os teores entre 1000 a 600 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ) ocorrem, principalmente, na parte leste da área, nas proximidades de Lapão e João Dourado. Dos 13 poços, apenas os poços C-033, C-38 e C-042 são o que apresentam os teores menores do que 600 mg/L ( $\text{CaCO}_3$ ). Semelhantes aos outros parâmetros, a distribuição da dureza também segue um controle de este para oeste.

Os gráficos de correlação entre a dureza e íons cálcio, nos dois períodos de amostragem, mostram que os maiores valores da dureza estão relacionados com 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 da Formação Salitre e das suas unidades, na Bacia do Riacho do Juá (Figura 7.50). A elevação dos teores da dureza ainda recebe influência dos constituintes magnésio, cloreto, sódio e sulfato, conforme demonstrado pelas representativas correlações nos gráficos nas Figuras 7.51 a 7.54.

A Tabela 7.8 mostra a classificação da dureza segundo Custódio & Llamas (1983). De acordo com essa classificação, as águas muito duras são dominantes, na área, nos dois períodos de amostragem (Figuras 7.48 e 7.49).

**Tabela 7.8 - Classificação das águas segundo a dureza em mg/L (CaCO<sub>3</sub>) (Custódio & Llamas, 1983).**

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



**Figura 7.47: Resultados de Dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

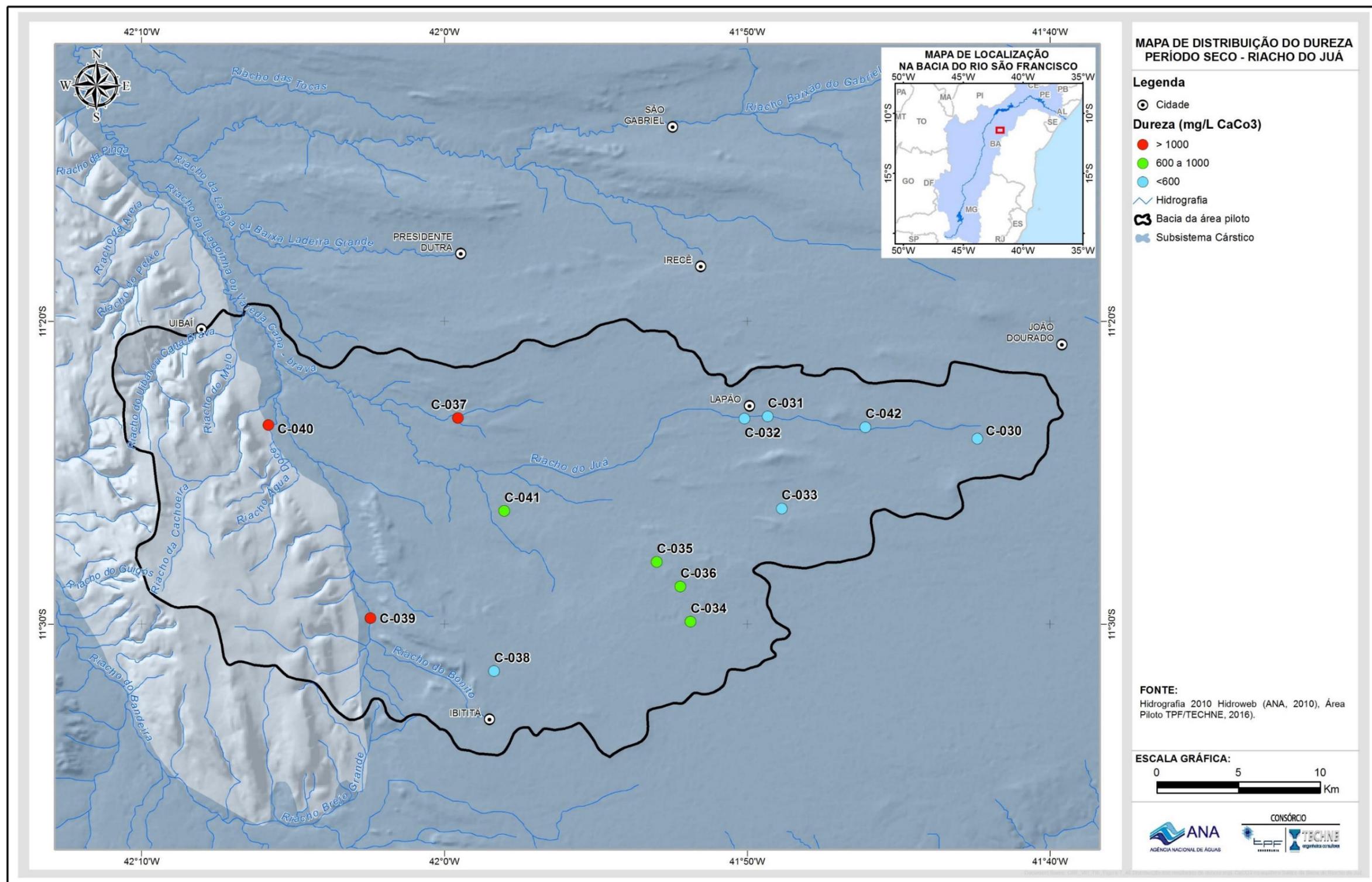


Figura 7.48: Distribuição dos resultados de dureza (mg/L CaCO<sup>3</sup>) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

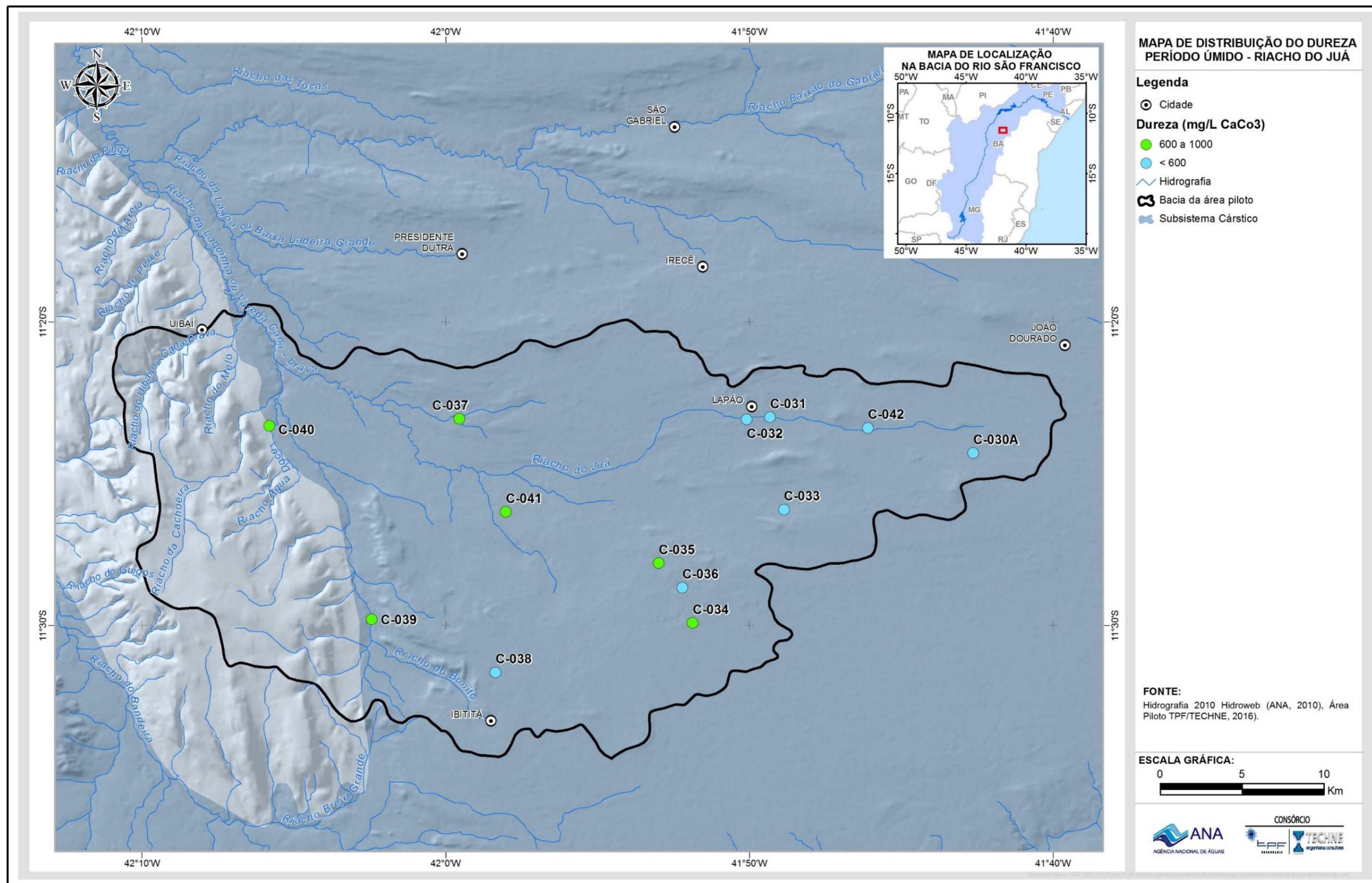
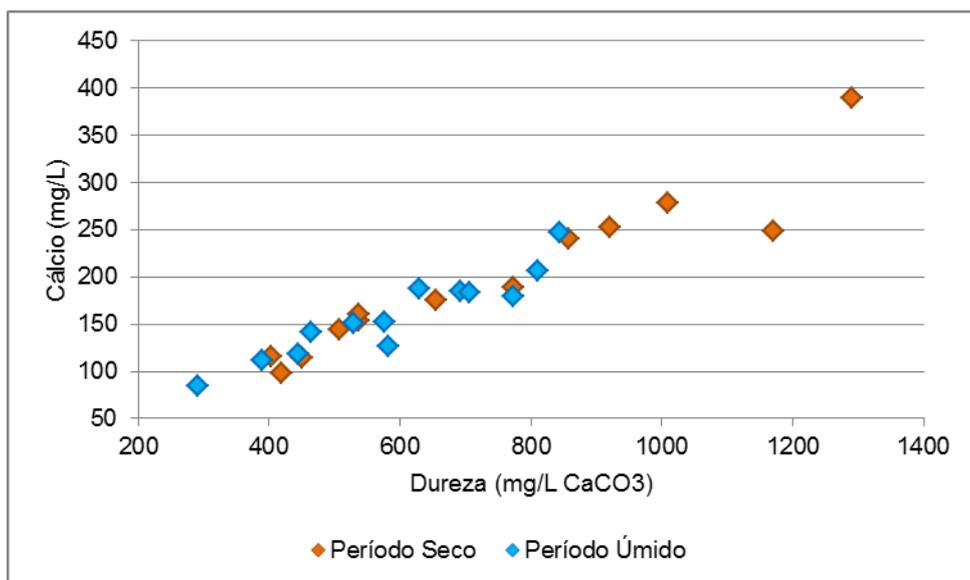
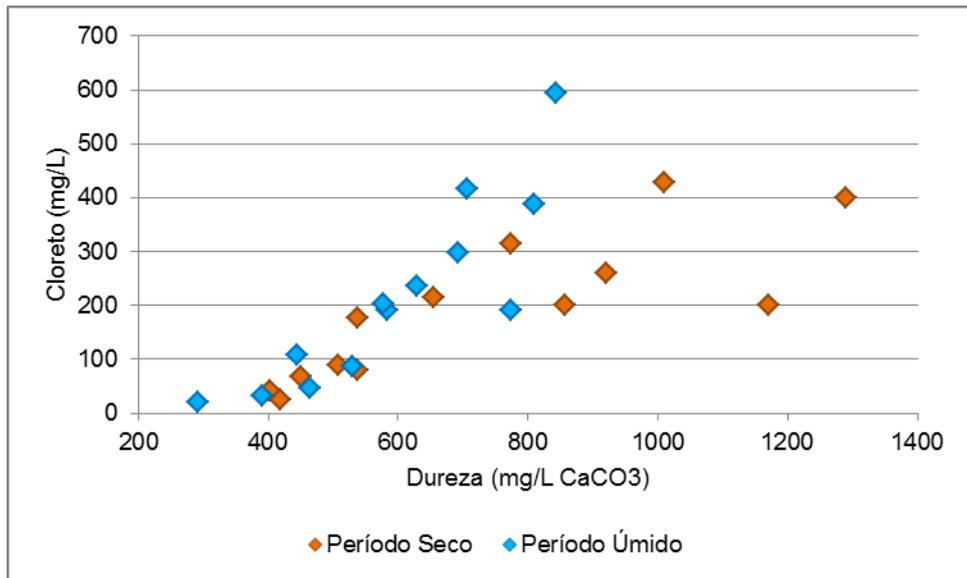
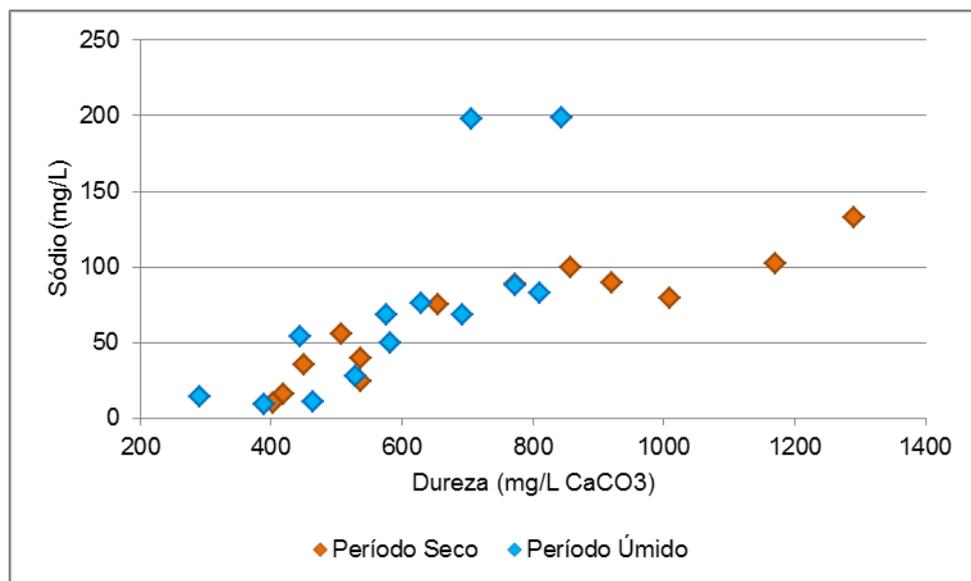


Figura 7.49: Distribuição dos resultados de dureza (mg/L CaCO<sup>3</sup>) no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.

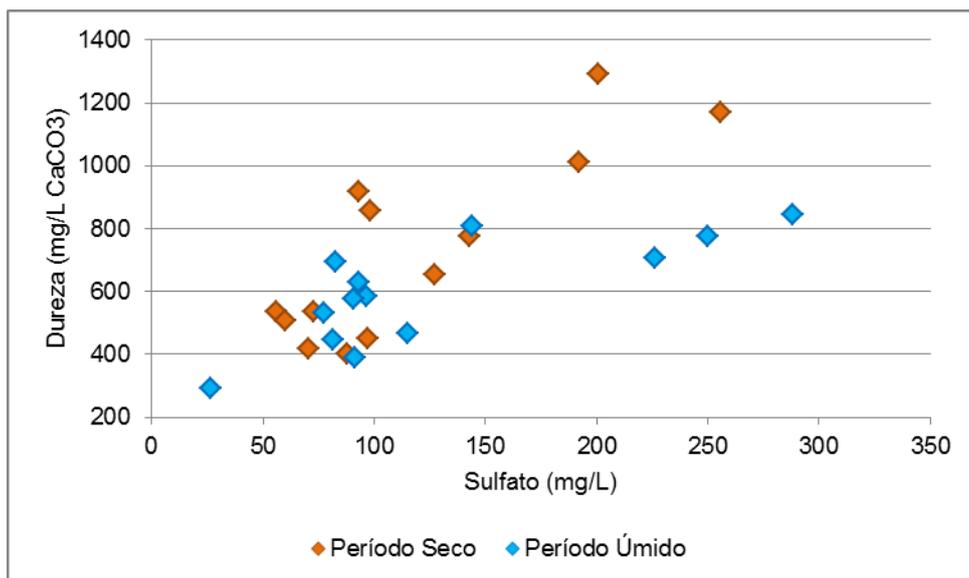




**Figura 7.52: Correlação entre a dureza e cloreto no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados.**



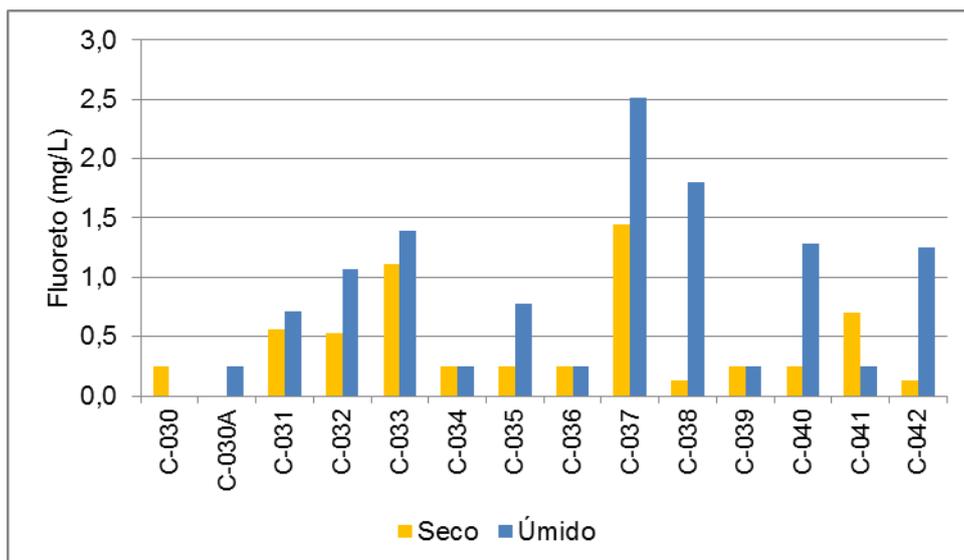
**Figura 7.53: Correlação entre a dureza e sódio no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados.**



**Figura 7.54: Correlação entre a dureza e sulfato no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos períodos amostrados.**

Nas águas estudadas é frequentemente observado, ainda, o constituinte secundário fluoreto em teores acima de 0,5 mg/L. As Tabelas 7.6 e 7.7 mostram o sumário estatístico do fluoreto para os dois períodos amostrais. No período seco os teores de fluoreto variaram de 0,03 a 1,45 mg/L, com média de 0,47 mg/L e mediana de 0,25 mg/L. No úmido, os teores de fluoreto elevam-se, oscilando de 0,25 a 2,51 mg/L, com média de 0,93 mg/L e mediana de 0,78 mg/L. A Figura 7.55 mostra os teores de fluoreto por poço, tanto no período seco quanto no úmido. Nota-se que é no período úmido que ocorrem os maiores teores, inclusive com resultados acima ou próximo de 1,5 mg/L, como são os casos dos poços C-033, C-037, C-038, C-040 e C-042.

As Figuras 7.56 e 7.57 mostram a distribuição do fluoreto nos dois períodos de amostragem. Verifica-se que no período seco não ocorre nenhum poço com teores acima de 1,5 mg/L. Entretanto, no período úmido a situação dos poços C-037 e C-038, situados, respectivamente, na parte sul e norte da área, registram teores acima de > 1,5 mg/L de fluoreto. Os teores elevados de fluoreto nas águas desses poços podem estar relacionados à presença de fluorita, que ocorre de forma descontínua nos carbonatos dolomíticos na área (Misi,1979). Ainda que poucos poços com teores elevados de fluoreto tenham sido encontrados, merece destaque o fato de não ter sido verificados indícios de fluorose na população. Durante a etapa de amostragem de águas foram realizadas consultas informais com os proprietários e usuários dos poços, bem como, procedeu-se visita às instituições de saúde municipais.



**Figura 7.55: Resultados de fluoreto (mg/L) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

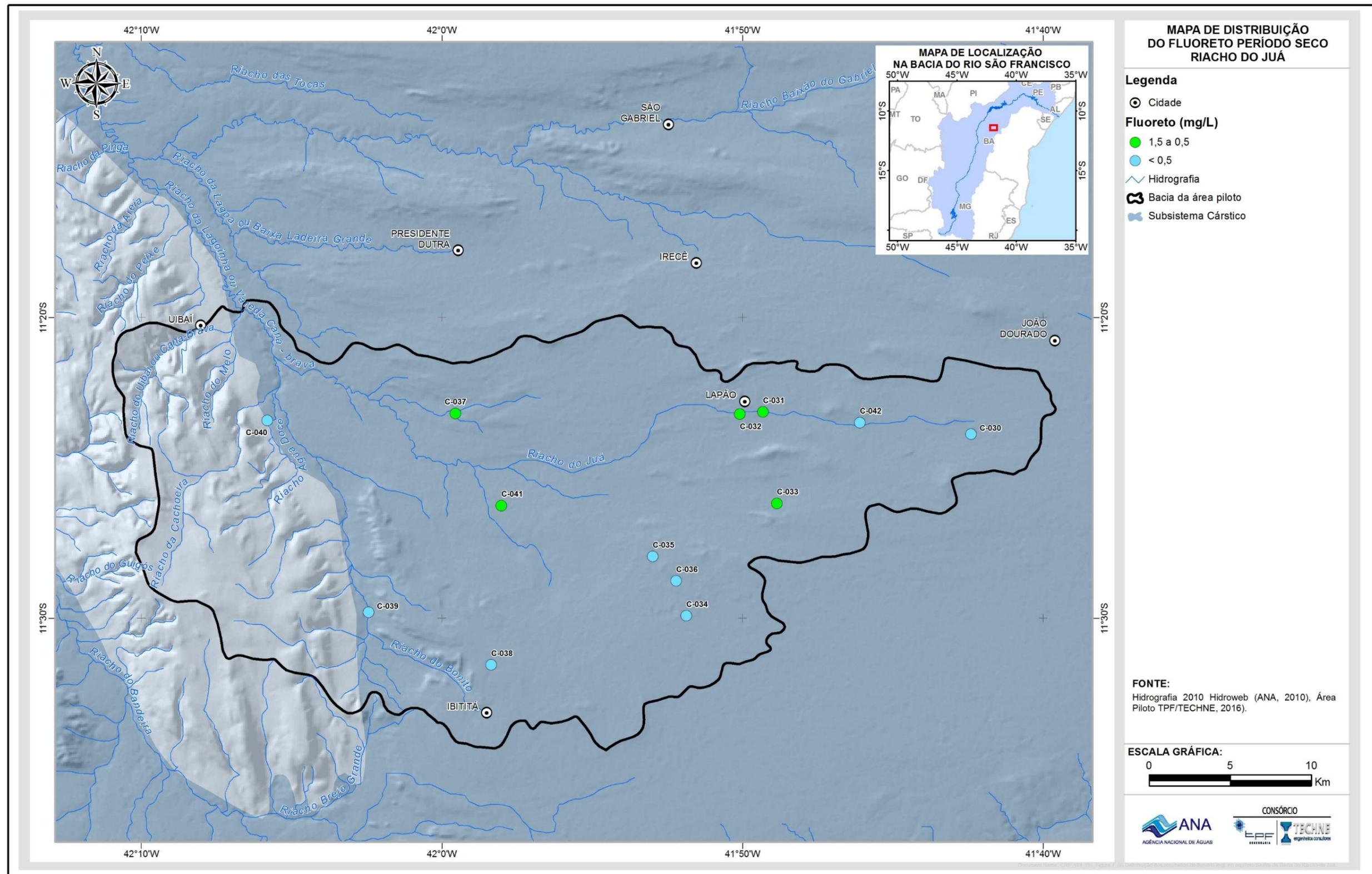


Figura 7.56: Distribuição dos resultados de fluoreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

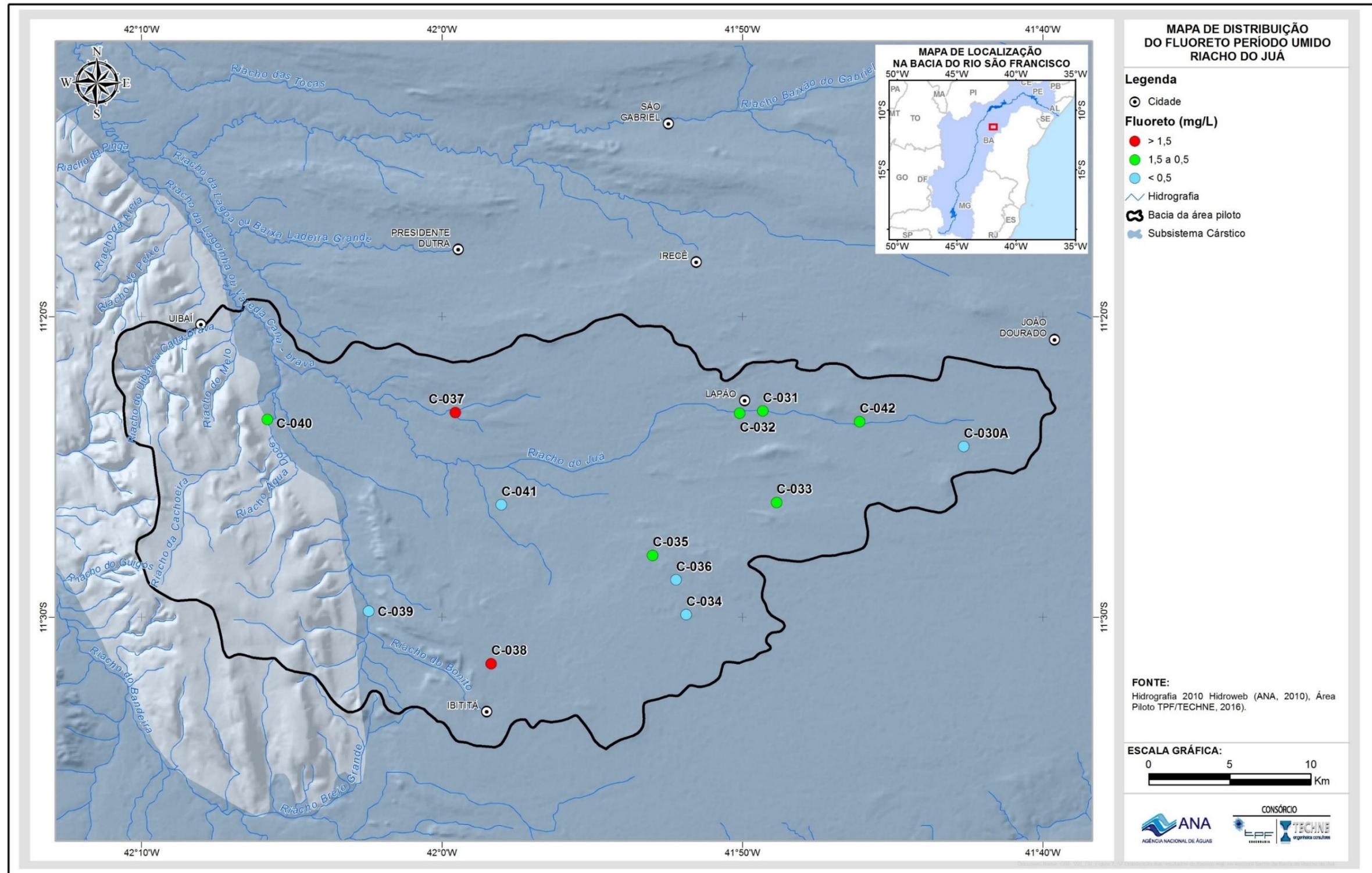


Figura 7.57: Distribuição dos resultados de fluoreto (mg/L) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.

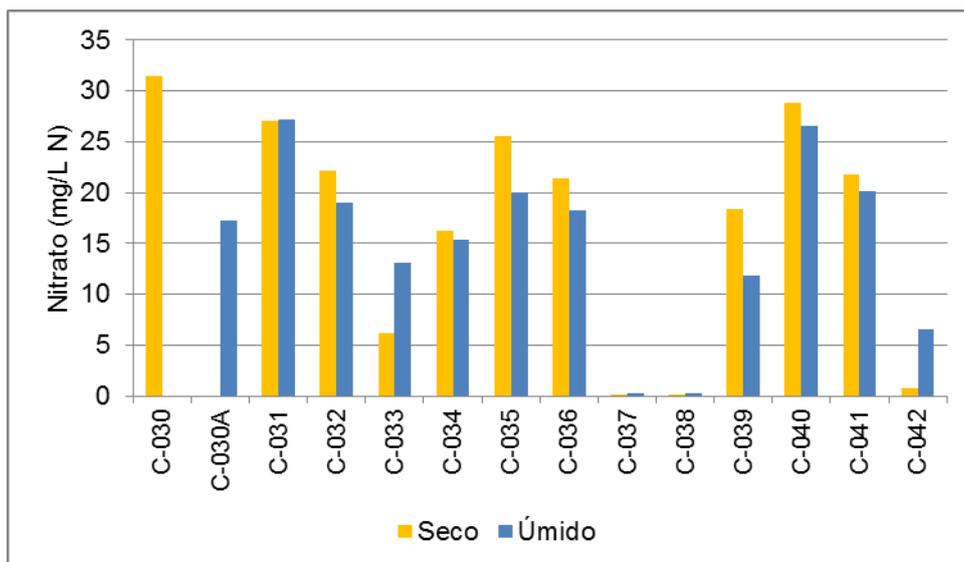
O nitrato é o mais importante dos compostos nitrogenados presentes nas águas subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá, visto que o nitrito e amônia ocorrem no limite de qualificação do método de análise (LQ). No período seco, o teor de nitrato variou de 0,15 a 31,5 mg/L, com média de 16,94 mg/L, e no período úmido as variações foram de 0,25 a 27,2 mg/L, com média de 15,04 mg/L (Tabelas 7.6 e 7.7). A Figura 7.58 mostra os teores de nitrato em cada poço por período amostral (seco e úmido). Percebe-se que a maioria dos poços registra teores de nitrato acima de 10 mg/L. Apenas os poços C-037, C-038 e C-042 apresentam teores baixos de nitrato.

Nas águas subterrâneas da Bacia do Riacho do Juá é possível observar uma tendência de enriquecimento da maioria dos parâmetros no sentido de leste para oeste. Entretanto, com relação ao nitrato, parece não existir nenhum padrão de controle para justificar o seu comportamento na área estudada (Figuras 7.59 e 7.60). Os maiores teores (>15 mg/L N) de nitrato, bem como os menores (<5 mg/L N) estão distribuídos aleatoriamente por toda a área, não seguindo, portanto, uma direção preferencial.

As Figuras 7.61 a 7.64 mostram os gráficos de correlação do nitrato com condutividade elétrica, STD, cloreto e cálcio, respectivamente. Verifica-se que o nitrato não tem correlação ou apenas mostra uma parcial e discreta correlação com esses parâmetros, especialmente com CE, STD e cloreto. Ressalta-se que os teores desses parâmetros são controlados, principalmente, pelo padrão de enriquecimento de leste para oeste, ou seja, têm menores teores nas zonas de recarga (porção leste).

Considera-se, a princípio, que o comportamento e a distribuição do nitrato da área de estudo não têm relação com o quimismo natural de evolução da água dentro do aquífero, sugerindo-se tratar de contaminação de origem antrópica, devida à falta de saneamento básico. A vocação agrícola da área pode, também, indicar a fonte do nitrato dissolvido nas águas, já que os fertilizantes utilizados nas práticas agrícolas contêm nitrogênio. A discreta e parcial correlação com CE, STD e cloreto pode reforçar essa hipótese, conforme visualizados nas Figuras 7.63, 7.64 e 7.66, respectivamente.

Nesse raciocínio, a maior parte da distribuição do cloreto está relacionada ao mecanismo de evolução da água no aquífero Salitre e uma parte menor, possivelmente, se relaciona ao crescimento nos teores de nitrato e de origem antropogênica. No gráfico da Figura 7.66 a seta indica uma leve tendência de correlação positiva entre cloreto e nitrato, para teores mais elevados de nitrato (> 10 mg/L).



**Figura 7.58: Resultados de nitrato (mg/L N) nas águas do aquífero Salitre na bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrais.**

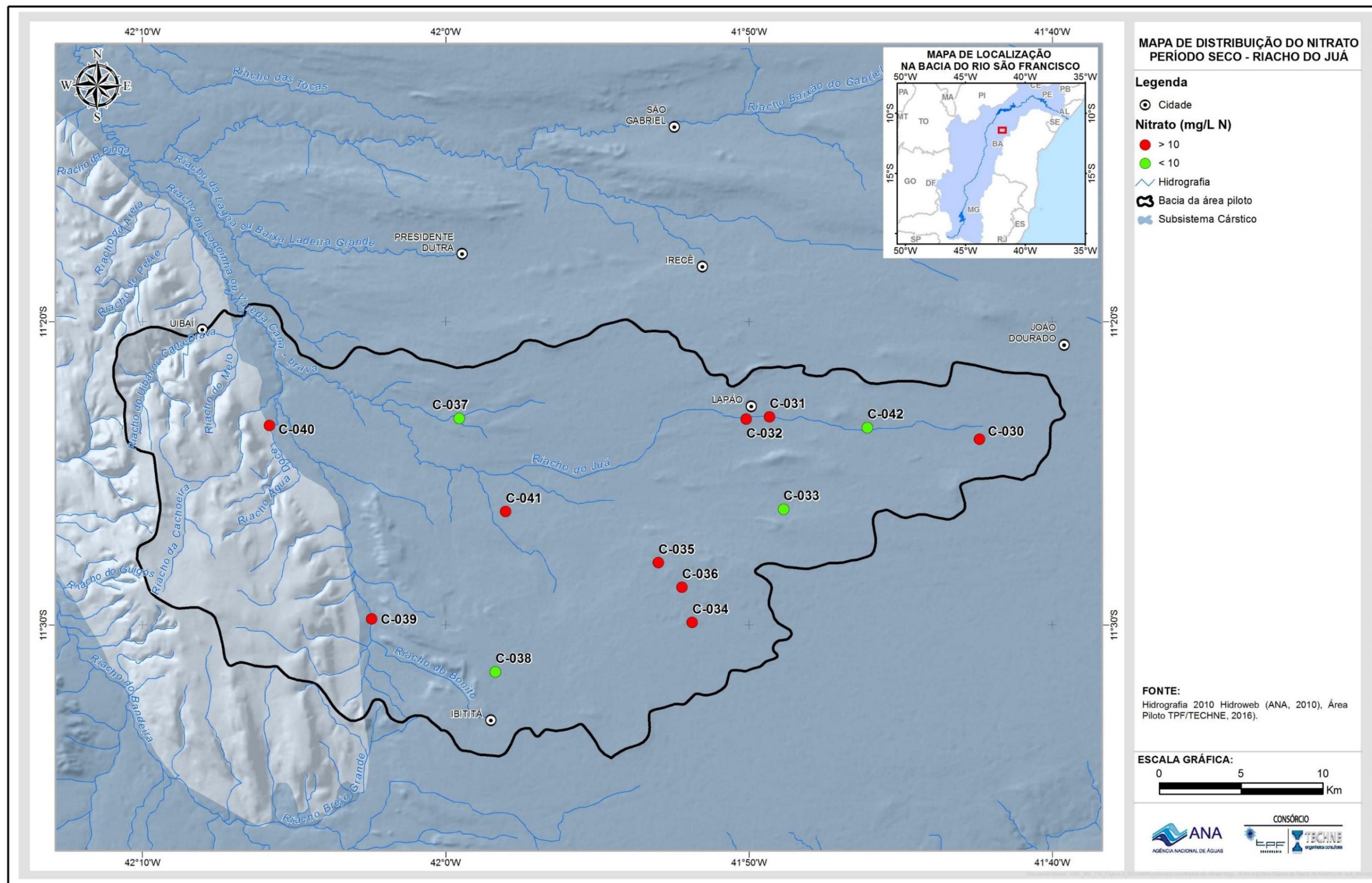


Figura 7.59: Distribuição dos resultados de nitrato (mg/L - N) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período seco.

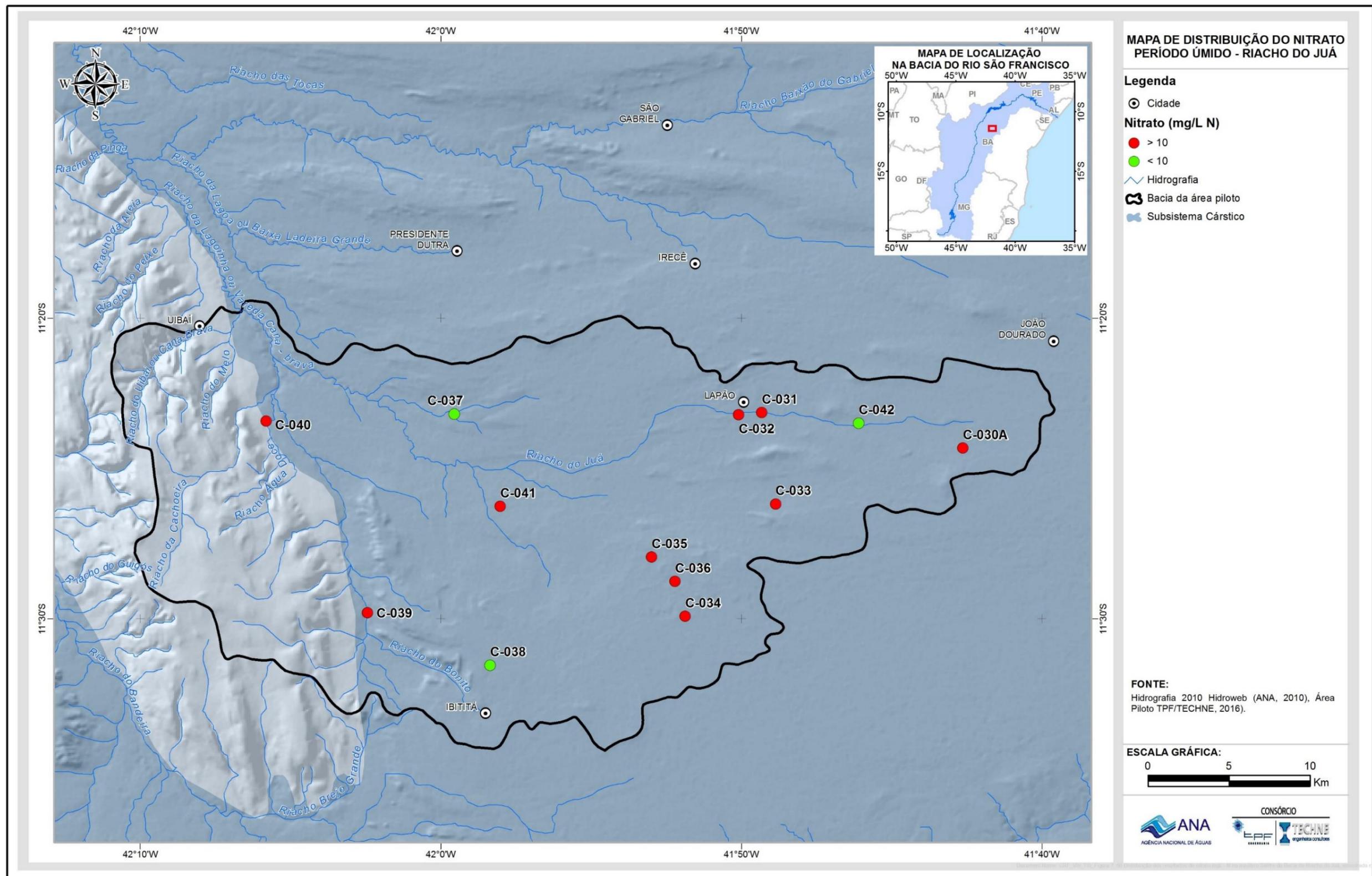
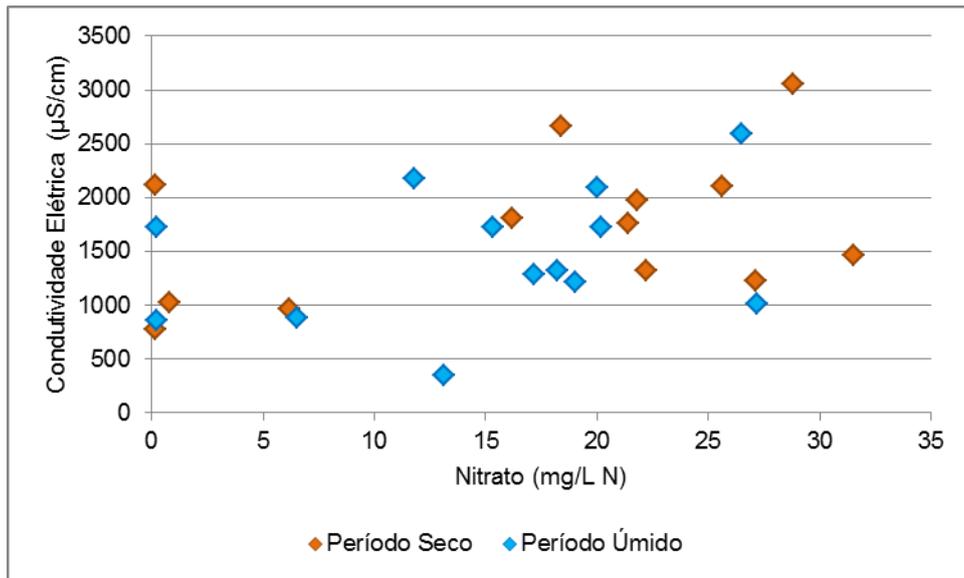
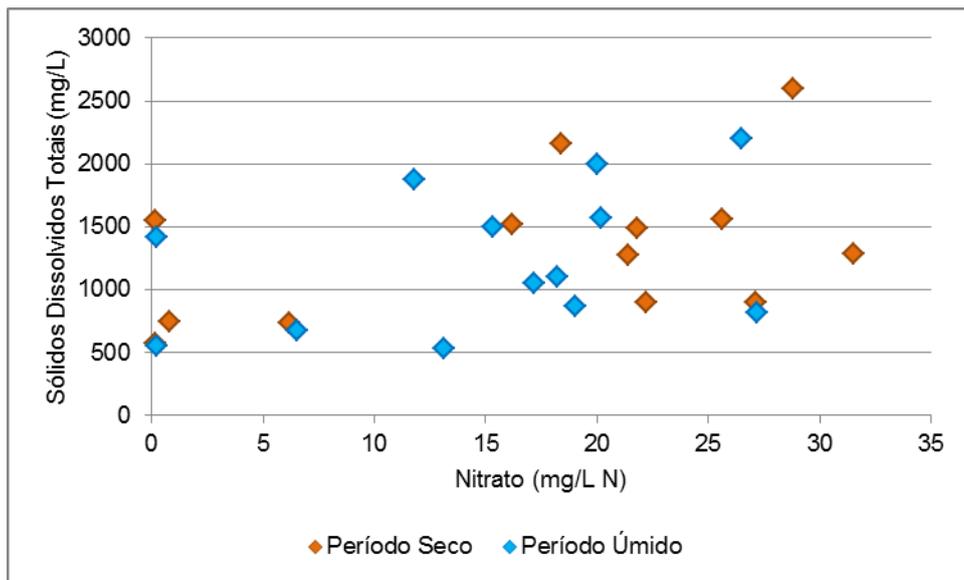


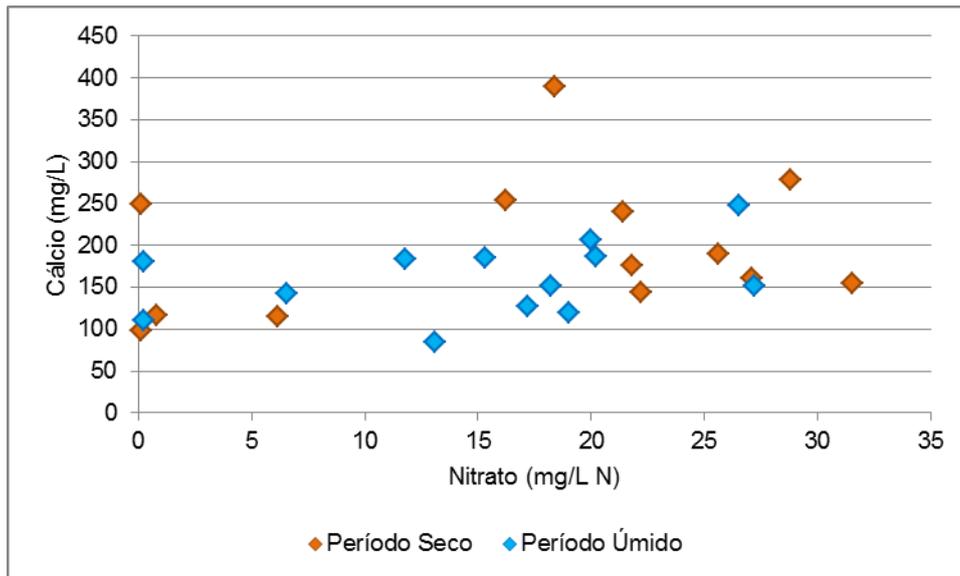
Figura 7.60: Distribuição dos resultados de nitrato (mg/L - N) no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, amostrado no período úmido.



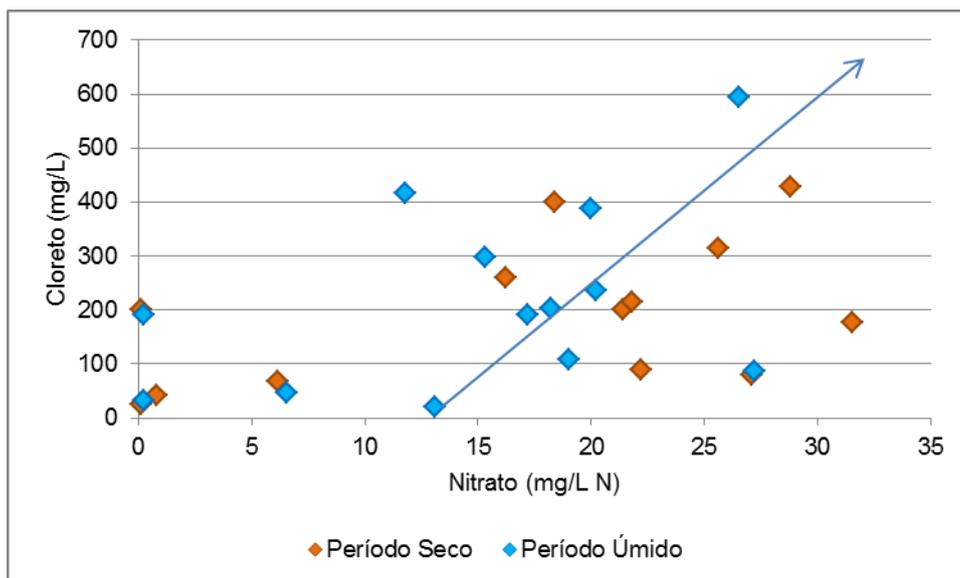
**Figura 7.61: Correlação entre a nitrato e condutividade elétrica no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados.**



**Figura 7.62: Correlação entre nitrato e STD no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados.**



**Figura 7.63: Correlação entre nitrato e cálcio no aquífero Salitre da Bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados.**



**Figura 7.64: Correlação entre nitrato e cloreto no aquífero Salitre da bacia do Riacho do Juá, em ambos os períodos amostrados.**

### 7.3.2 Fácies hidroquímicas

Nas Figuras 7.65 e 7.66 (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 amostras.

As mesmas amostras estão também representadas em diagramas de Stiff (Stiff 1955) nas Figuras 7.67 e 7.68 (período seco e período úmido, respectivamente). A espacialização dos diagramas de Stiff permite uma avaliação das quantidades relativas de íons principais dissolvidos nas águas.

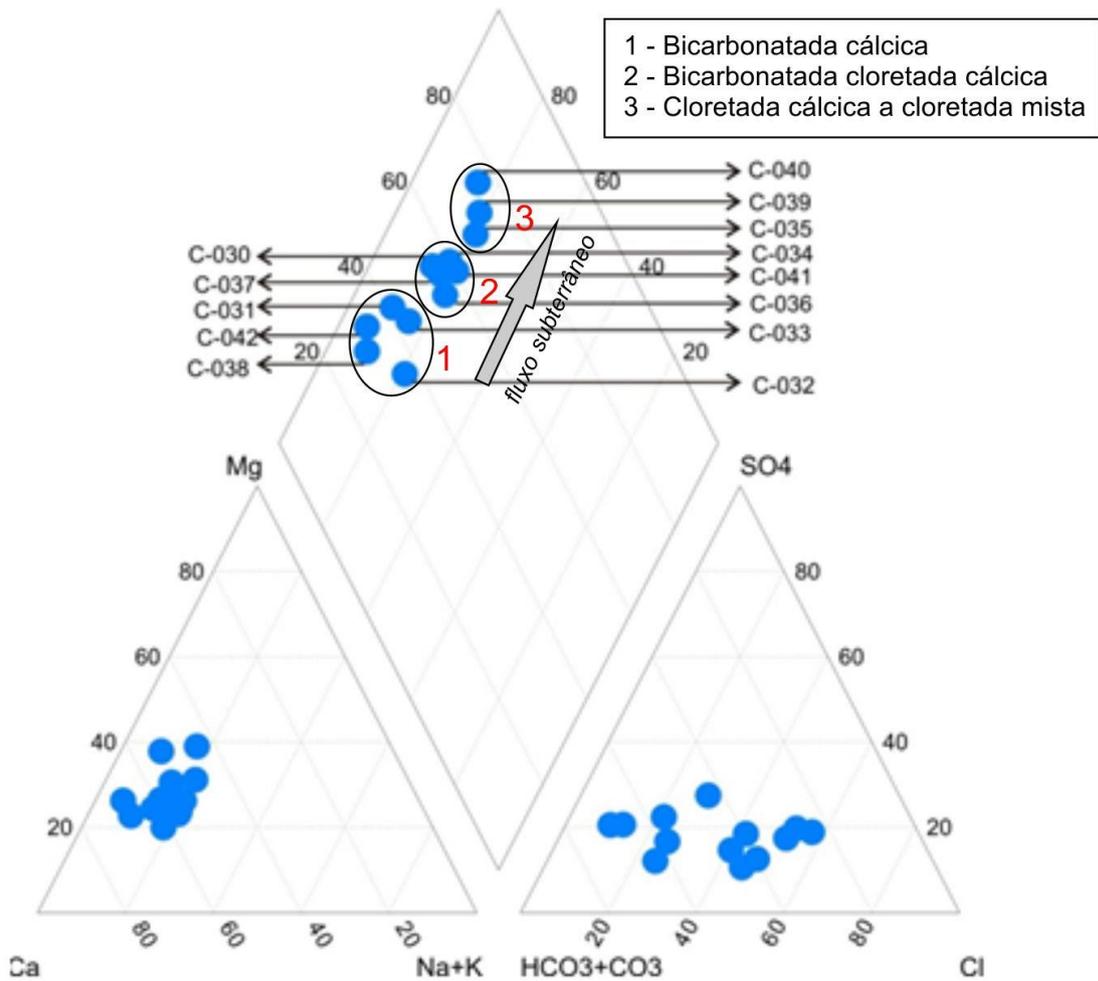
No diagrama de associação de Piper (Figuras 7.66 e 7.67) é possível visualizar três campos de águas com fácies hidroquímicas distintas, as quais são também individualizadas na Tabela 7.9: águas bicarbonatadas cálcicas (1), águas bicarbonatadas cloretadas cálcicas (2) e águas cloretadas cálcicas a cloretadas mistas (3).

A espacialização desses grupos na área de estudo (Figuras 7.69 e 7.70) permite verificar que nos setores de maior carstificação e conseqüentemente maior circulação, as águas tendem a ser bicarbonatadas cálcica (setor leste), passando a bicarbonatadas cloretadas cálcicas ao longo do fluxo subterrâneo e finalmente cloretadas cálcicas a cloretadas mistas nos setores de descarga, já nas proximidades dos afloramentos da formação Morro do Chapéu.

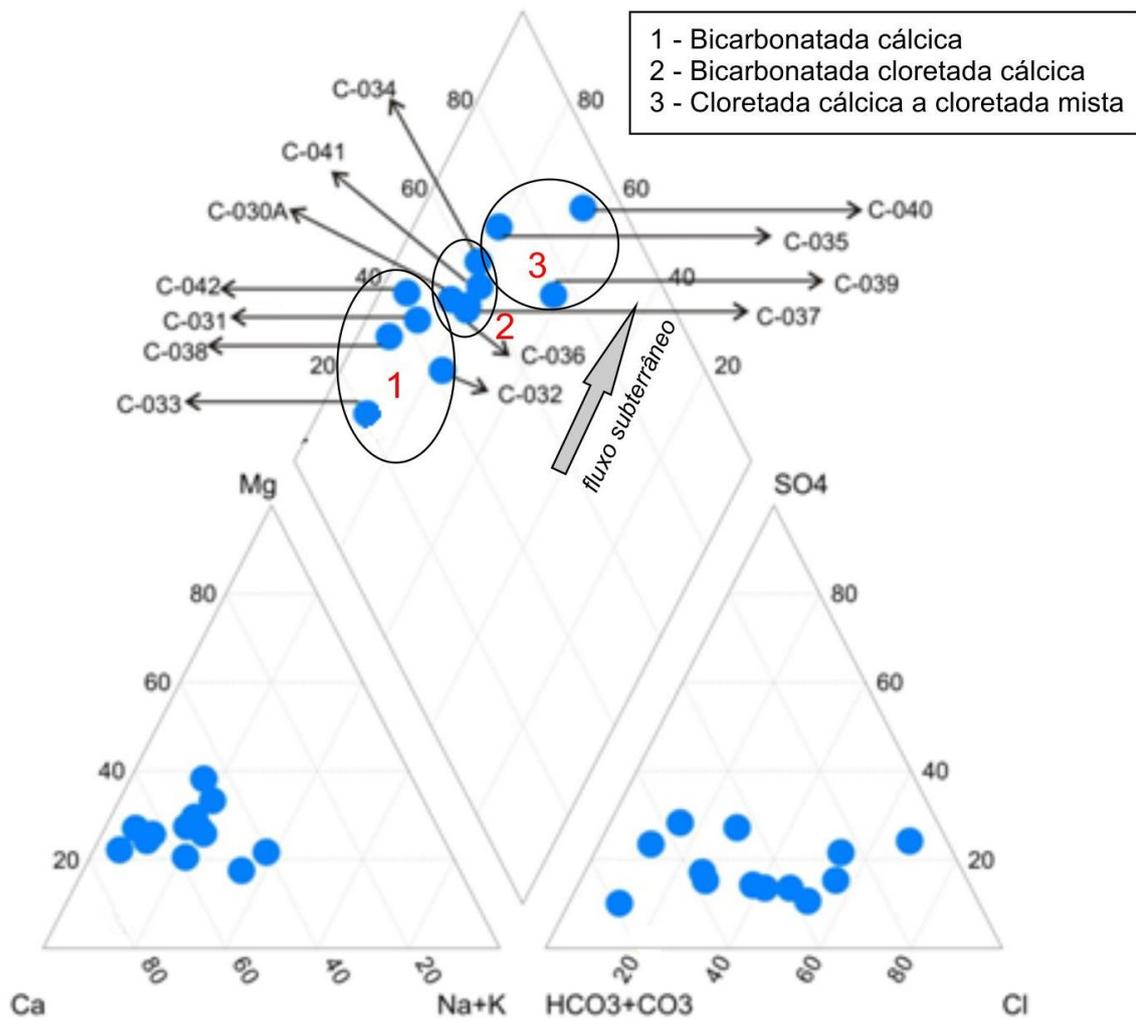
Através dos diagramas de Stiff (Figuras 7.67 e 7.68) pode-se verificar que no setor leste, isto é, nas zonas de predomínio de águas bicarbonatadas cálcica, a concentração iônica dessas águas é menor, corroborando com os menores valores de sólidos totais dissolvidos, da ordem de 768 mg/L no período seco e 688 mg/L no período úmido, em média (Tabela 7.9), portanto, classificadas como águas doces.

O conteúdo iônico dessas águas cresce de leste para oeste. A porção central da área, com águas bicarbonatadas cloretadas cálcicas apresenta salinidade intermediária, da ordem de 1426 mg/L de STD no período seco e 1325 mg/L de STD no período úmido (Tabela 7.9), portanto, classificadas como águas moderadamente salobras.

A faixa oeste, nos setores de descarga de águas subterrâneas na bacia do Riacho do Juá, as águas são cloretadas cálcicas a cloretadas mistas, com salinidade da ordem de 2105 mg/L no período seco e 2022 mg/L no período úmido, portanto, contendo as águas de maior conteúdo iônico no âmbito estudado.



**Figura 7.65: Diagrama de Piper das amostras coletadas na Bacia do Riacho do Juá no período seco.**



**Figura 7.66: Diagrama de Piper das amostras coletadas na Bacia do Riacho do Juá no período úmido.**

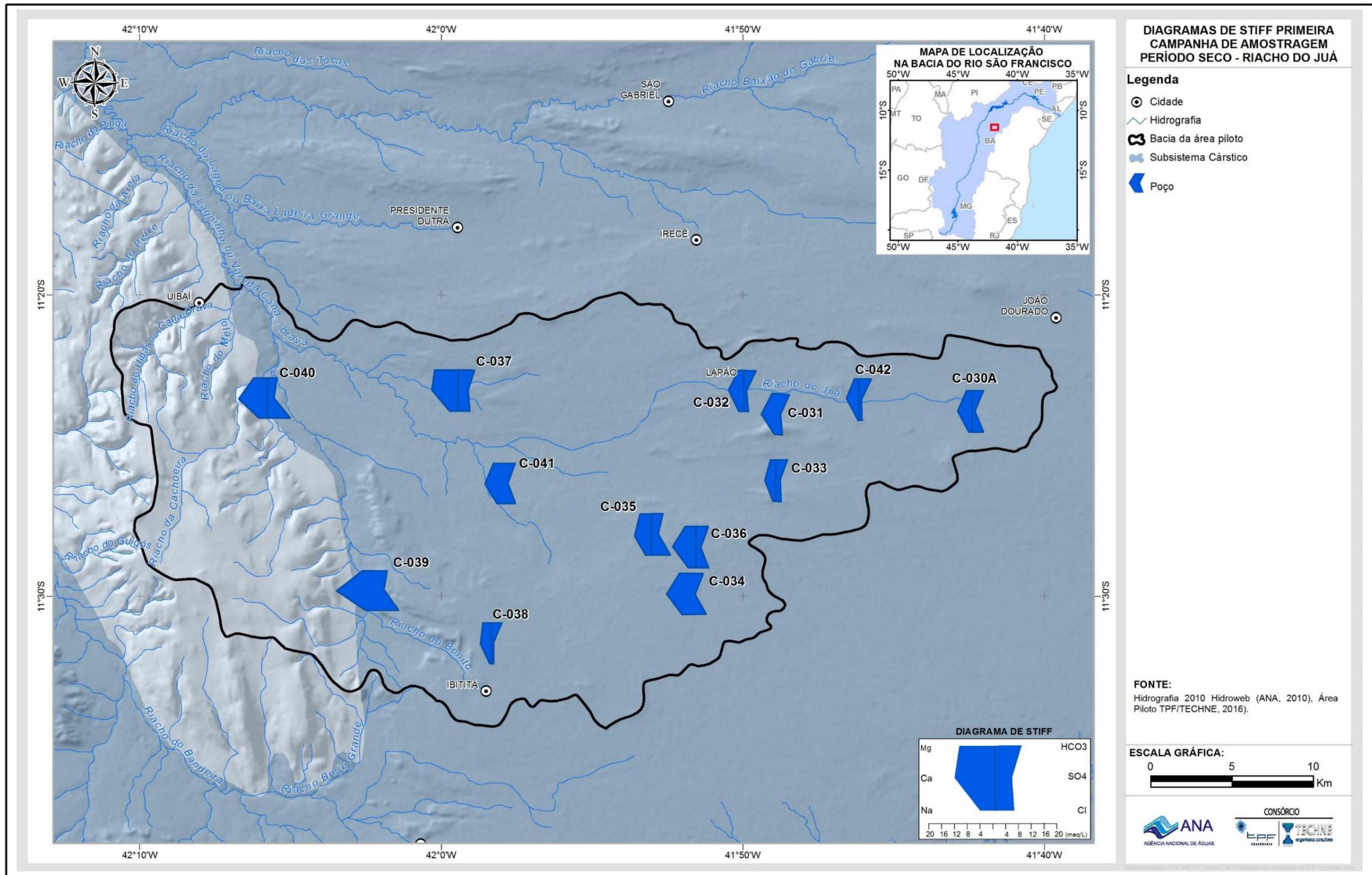


Figura 7.67: Distribuição dos diagramas de Stiff no período seco.

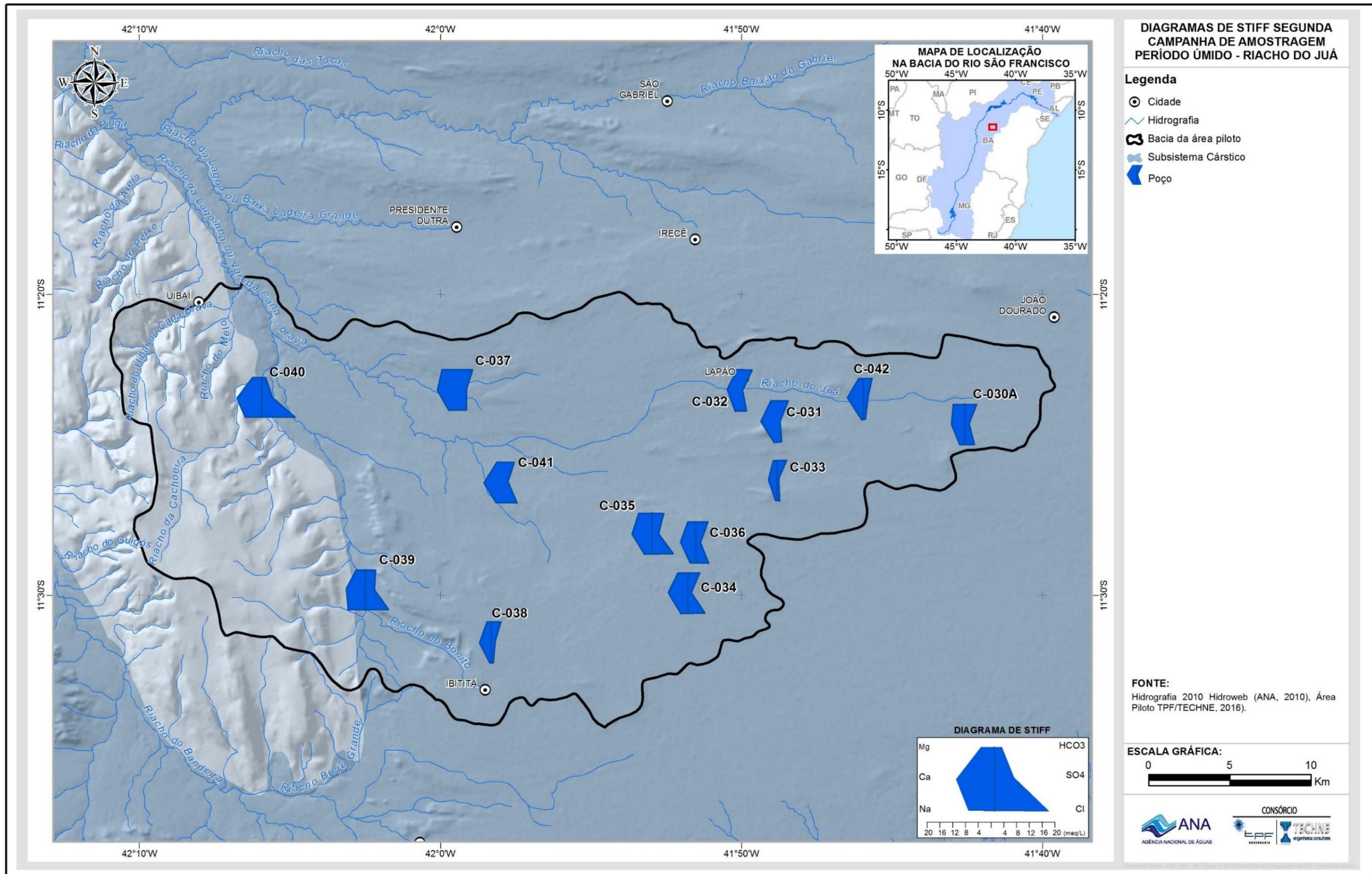


Figura 7.68: Distribuição dos diagramas de Stiff no período úmido.

**Tabela 7.9 – Classificação das águas avaliadas na Bacia do Riacho do Juá.**

Campo no diagrama de Piper	ID	Período seco		Período úmido	
		Fácies	STD (mg/L)	Fácies	STD (mg/L)
1	C-031	Bicarbonatada cálcica	897	Bicarbonatada cálcica	817
	C-032	Bicarbonatada cálcica	894	Bicarbonatada cálcica	868
	C-033	Bicarbonatada cálcica	733	Bicarbonatada cálcica	530
	C-038	Bicarbonatada cálcica	573	Bicarbonatada cálcica	554
	C-042	Bicarbonatada cálcica	745	Bicarbonatada cálcica	672
2	C-030	Bicarbonatada cloretada cálcica	1288	-	-
	C-030A	-	-	Bicarbonatada cloretada cálcica	1046
	C-034	Bicarbonatada cloretada cálcica	1518	Bicarbonatada cloretada cálcica	1502
	C-036	Bicarbonatada cloretada cálcica	1278	Bicarbonatada cloretada cálcica	1099
	C-037	Bicarbonatada cloretada cálcica	1552	Bicarbonatada cloretada cálcica	1414
	C-041	Bicarbonatada cloretada cálcica	1493	Bicarbonatada cloretada cálcica	1566
3	C-035	Cloretada mista	1555	Cloretada cálcica	1999
	C-039	Cloretada cálcica	2158	Cloretada mista	1870
	C-040	Cloretada cálcica	2602	Cloretada mista	2197
	C-217	-	-	Bicarbonatada cálcica	306

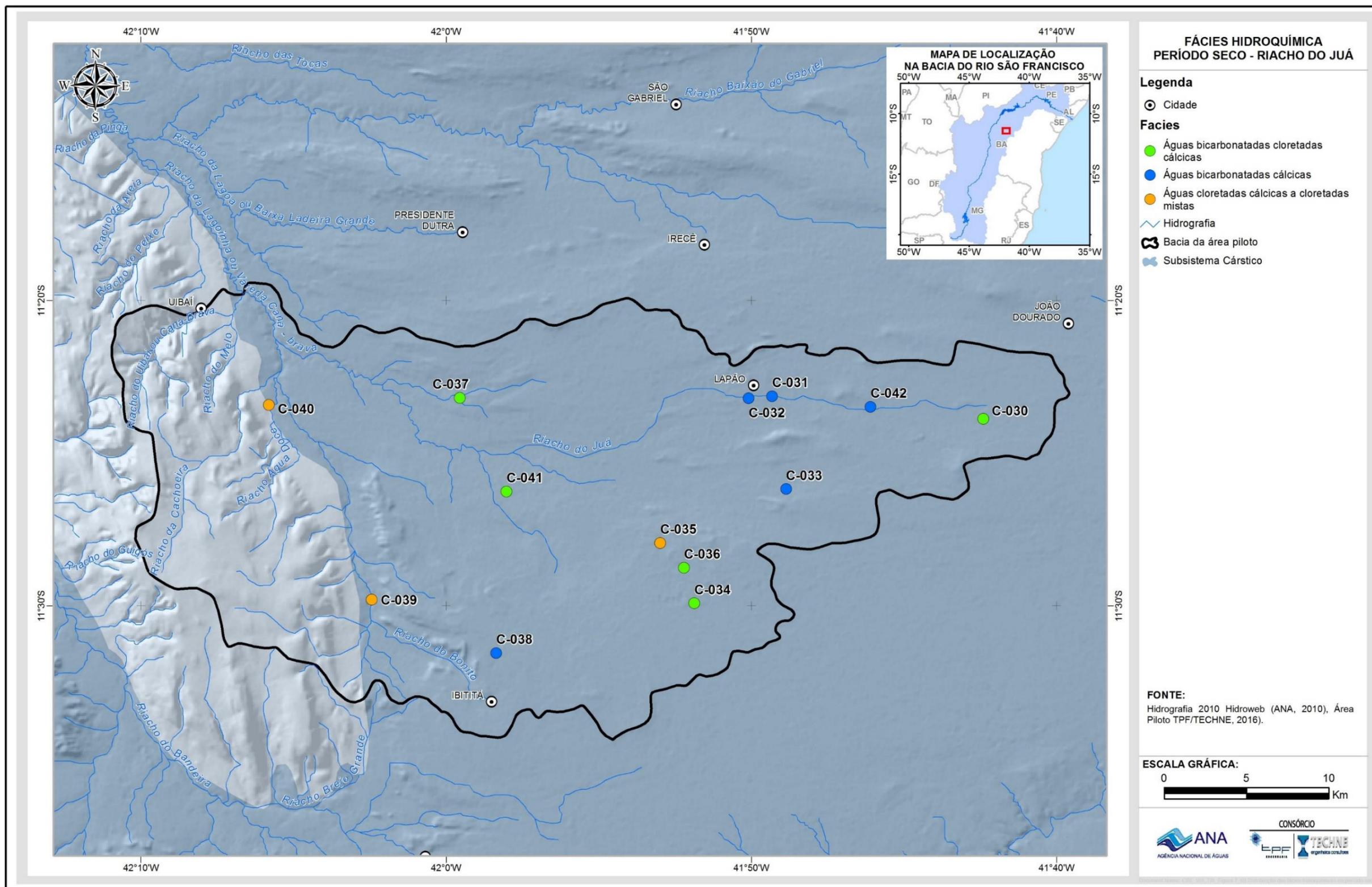


Figura 7.69: Distribuição das fácies hidroquímicas no período seco.

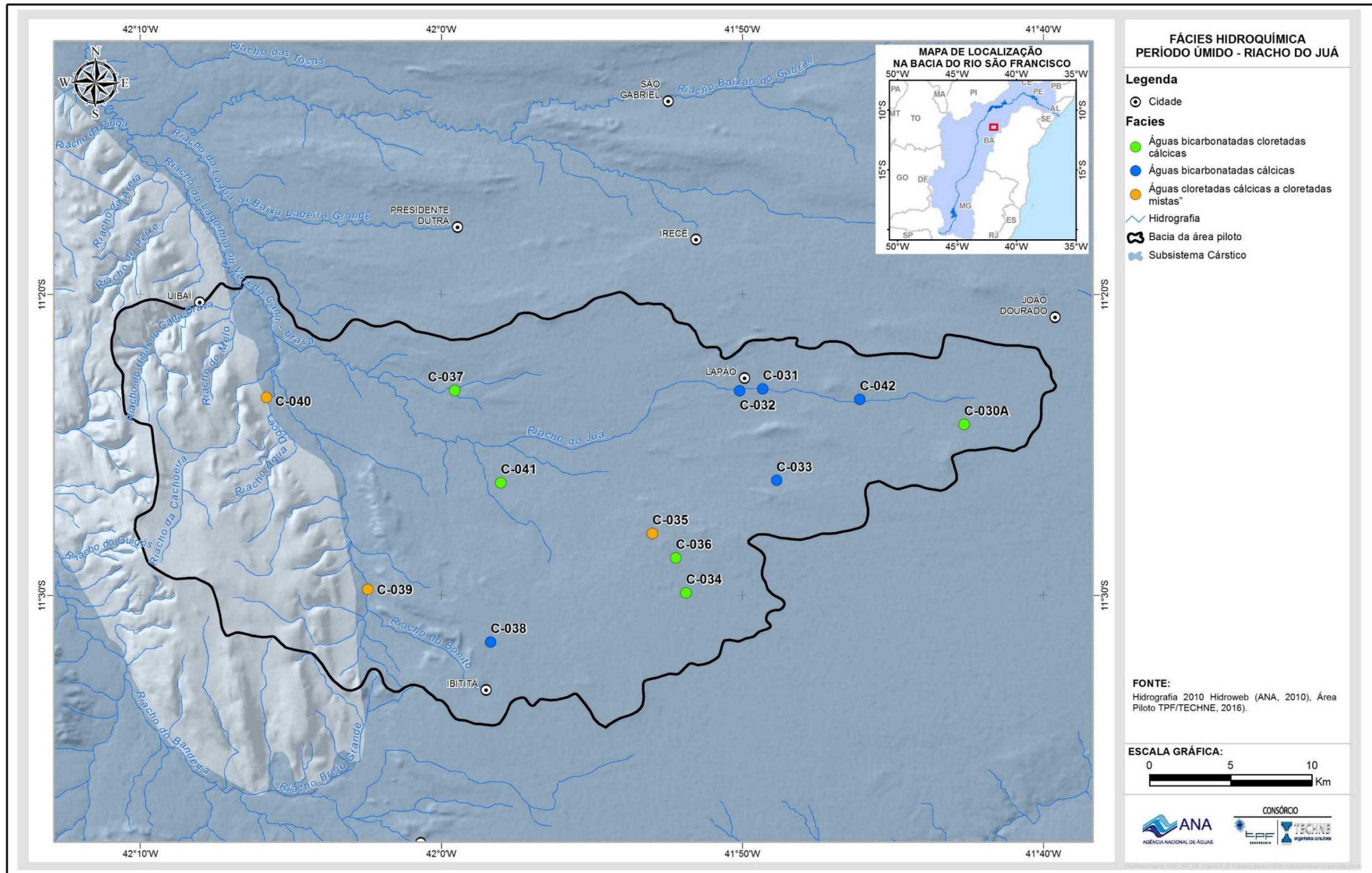


Figura 7.70: Distribuição das fácies hidroquímicas no período úmido.

### 7.3.3 Parâmetros específicos

#### 7.3.3.1 Metais pesados

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

Na Bacia do Riacho do Juá foram selecionados três pontos de coleta para determinação de metais pesados. Para os parâmetros cádmio, chumbo, cobre cromo e mercúrio todos os resultados foram abaixo do limite de detecção (<0,001) e para os demais parâmetros (arsênio, boro, bário, níquel e zinco) foram detectados apenas traços, cujos resultados estão apresentados na Tabela 7.10.

**Tabela 7.10 – Resultados analíticos para metais pesados (mg/L) avaliados na bacia do Riacho do Juá.**

ID	C-038	C-040	C-042
Município	Ibititá	Uibaí	Lapão
Localidade	Baixa do Velho Zuza	Olho D'água	Bom Prazer
<b>Arsênio</b>	<0,001	<0,001	0,005
<b>Boro</b>	0,025	0,085	0,046
<b>Bário</b>	0,08	0,035	0,078
<b>Cádmio</b>	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Chumbo</b>	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Cobre</b>	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Cromo</b>	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Mercúrio</b>	<0,001	<0,001	<0,001
<b>Níquel</b>	<0,001	<0,001	0,003
<b>Zinco</b>	0,007	0,08	0,01

#### 7.3.3.2 Agroquímicos

Para avaliação dos agroquímicos foram analisadas 13 amostras de águas subterrâneas na Bacia do Riacho do Juá, conforme Tabela 7.11. 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 predomina a circulação rápida das águas subterrâneas através de fraturas e condutos de dissolução, o que pode explicar a não detecção desses compostos no momento da coleta. Não fica descartada a possível permanência desses agroquímicos nas camadas superficiais do solo, que dificultam ou impedem a sua lixiviação até a zona saturada.

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 7.11 – Pontos de coleta para agroquímicos na bacia do Riacho do Juá. Em todos os poços avaliados os resultados analíticos foram inferiores ao LD.**

ID	Município	Localidade	Culturas
C-030 <sup>a</sup>	João Dourado	Gameleira	Tomate, milho e cebola
C-031	Lapão	Fazenda Boa Vista	Cebola
C-032	Lapão	Centro	Milho e tomate
C-033	Lapão	Fazenda Tanque Novo	Tomate
C-034	Lapão	Povoado Lagoa dos Patos 1	Tomate
C-035	Lapão	Tanque	Milho, cenoura e mamona
C-036	Lapão	Tanque	Cenoura e milho
C-037	Presidente Dutra	Bela Vista	Pinha
C-038	Ibititá	Baixa do Velho Zuza	Milho
C-039	Uibaí	Alto da Cruz	Tomate e feno
C-040	Uibaí	Olho D'água	Pinha
C-041	Ibititá	Circo	Milho
C-042	Lapão	Bom Prazer	Milho e cenoura

### 7.3.3.3 Derivados de petróleo

Na avaliação desses compostos foram selecionados poços para a investigação de eventuais ocorrências de contaminantes em áreas no entorno de 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 três amostras (Tabela 7.12) na Bacia do Riacho do Juá 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 7.12 – Pontos de coleta para derivados de petróleo na bacia do Riacho do Juá. Em todos os poços avaliados os resultados analíticos foram inferiores ao LD.**

ID	C-038	C-040	C-042
<b>Município</b>	Ibititá	Uibaí	Lapão
<b>Localidade</b>	Baixa do Velho Zuza	Olho D'água	Bom Prazer

### 7.3.4 Qualidade das águas para o consumo humano

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

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

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

No Brasil, a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Os parâmetros considerados na referida Portaria e analisados no âmbito do estudo constam na Tabela 7.13 (substâncias químicas que representam risco à saúde) e Tabela 7.14 (substâncias organolépticas).

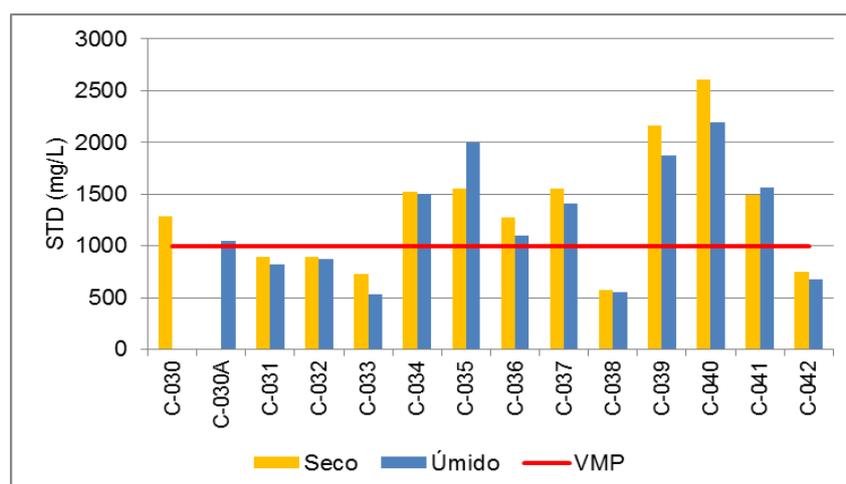
**Tabela 7.13 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias químicas que representam risco à saúde, avaliadas no presente estudo.**

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

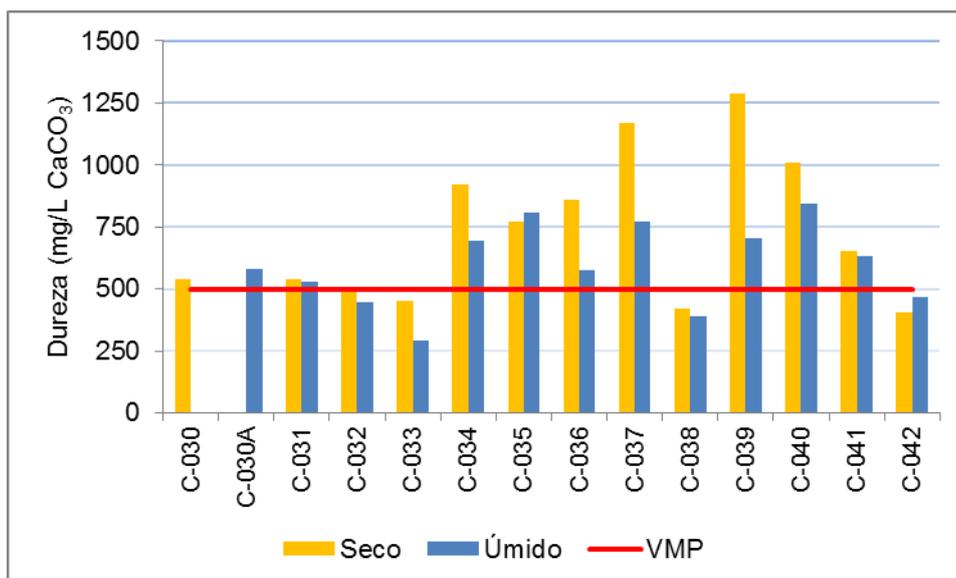
**Tabela 7.14 - Valores máximos aceitos para consumo humano de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011) para as substâncias de padrão organoléptico de potabilidade, avaliadas no presente estudo.**

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

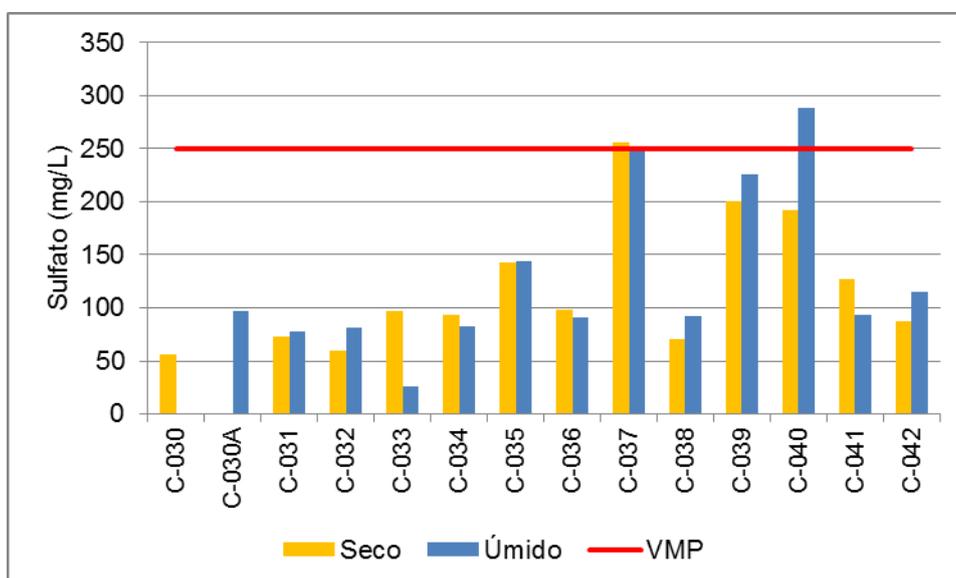
A avaliação dos resultados das análises químicas das amostras coletadas no âmbito do estudo em ambos os períodos amostrais, indicaram que os parâmetros STD, dureza, sulfato, cloreto, fluoreto, nitrato e ferro apresentaram resultados analíticos superiores aos VMP para águas de consumo humano em algumas amostras. Os referidos parâmetros e os teores obtidos são apresentados nas Figuras 7.71 a 7.77.



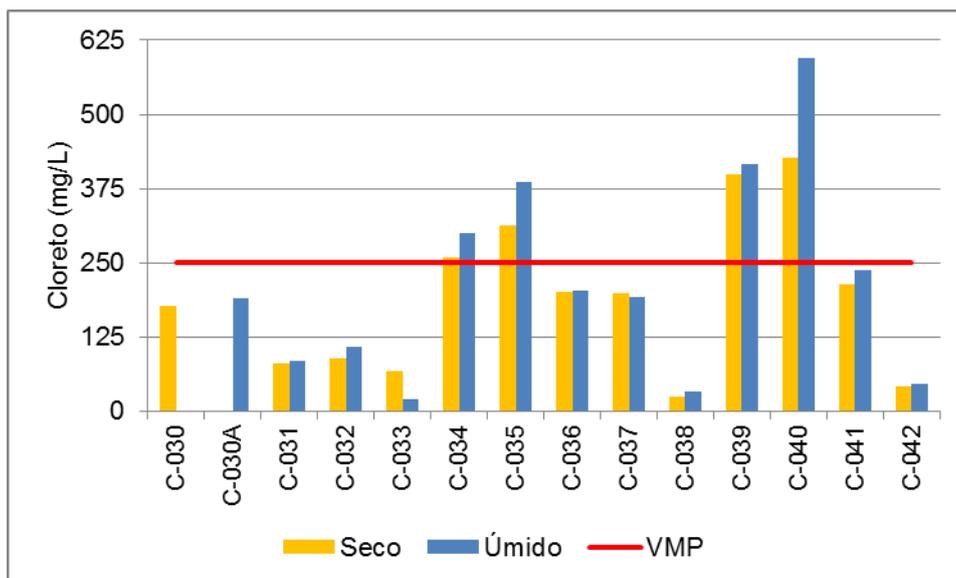
**Figura 7.71: Parâmetros STD e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



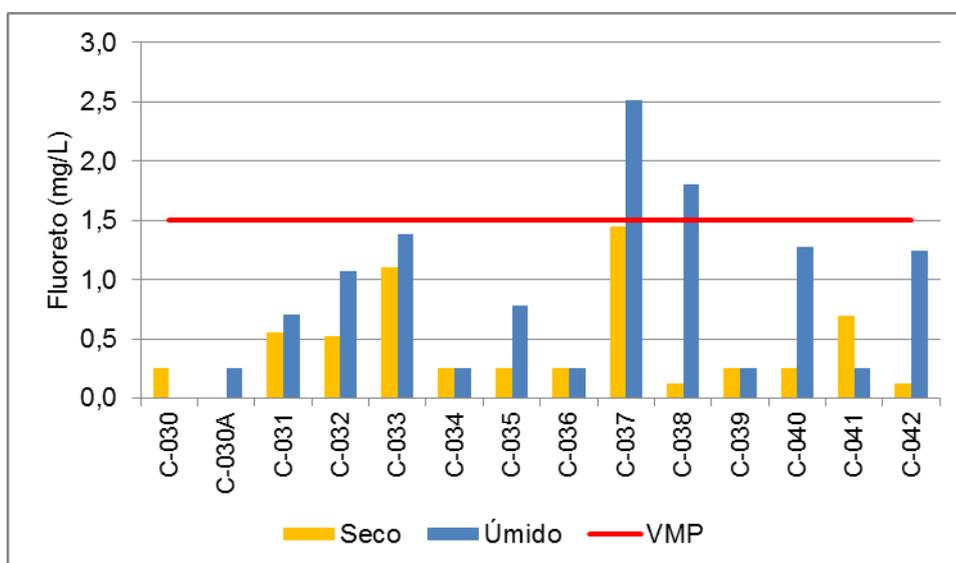
**Figura 7.72: Resultados analíticos para o parâmetro dureza e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



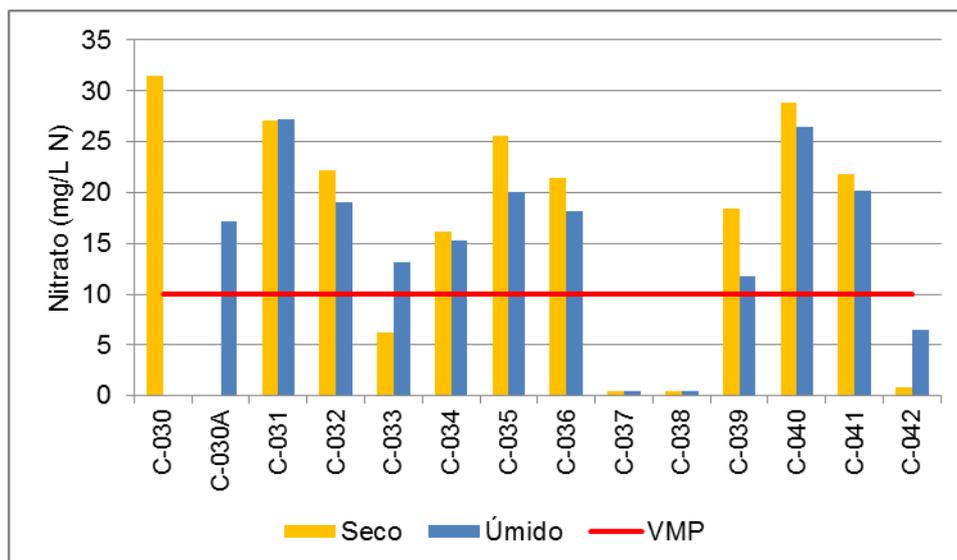
**Figura 7.73: Resultados analíticos para o parâmetro sulfato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



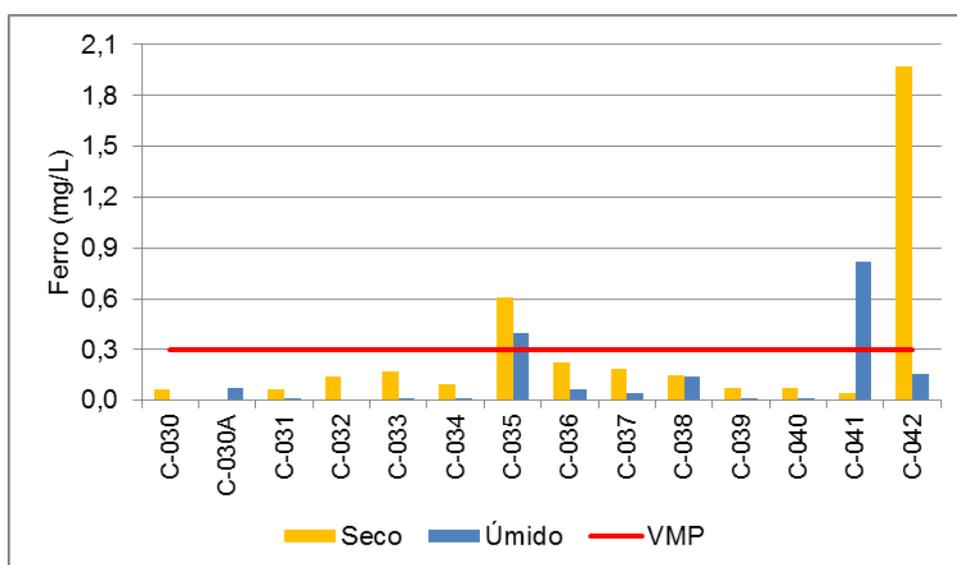
**Figura 7.74: Resultados analíticos para o parâmetro cloreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



**Figura 7.75: Resultados analíticos para o parâmetro fluoreto e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria n° 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



**Figura 7.76: Resultados analíticos para o parâmetro nitrato e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**



**Figura 7.77: Resultados analíticos para o parâmetro ferro e VMP para águas de consumo humano (conforme Portaria nº 2914/2011) representado pela linha vermelha. São impróprias para o consumo humano as amostras cujo limite da coluna ultrapassa a linha do VMP.**

Os parâmetros STD, dureza e nitrato excedem os valores máximos permitidos para as águas destinadas ao consumo humano para a maioria das amostras avaliadas (Tabela 7.15). A presença de sólidos totais dissolvidos nessas águas deve-se, provavelmente, a fatores naturais, notadamente a fatores climáticos e de circulação das águas no meio aquífero. A dureza também tem origem natural, a qual é controlada pela composição do arcabouço litológico que através da sua dissolução incrementa em cálcio e magnésio as águas do aquífero. Ao nitrato atribui-se uma origem antropogênica. Esse composto pode ocorrer nas águas subterrâneas em razão da sua utilização na agricultura, do descarte de esgotos sobre ou sob a superfície do solo e do esterco animal de criações intensivas. É provável que a principal origem do nitrato nas águas avaliadas seja a ausência de saneamento (uso de fossas sépticas e negras para depositar os dejetos humanos). Não fica descartada a origem pelo seu uso nas atividades agrícolas, entretanto não foram verificados agroquímicos em nenhuma das amostras avaliadas.

Os demais parâmetros (sulfato, cloreto, fluoreto e ferro) apresentam valores acima do VMP de forma pontual.

É importante ressaltar que a qualidade das águas do aquífero Salitre se apresenta comprometida desde o final da década de 70. Com índices de nitrato e cloreto preocupantes (Silva, 2005).

Nos anos oitenta e noventa foram registrados teores de nitrato acima de 10 mg/L N, principalmente nas regiões ocupadas por atividades agrícolas, atingindo até 18 mg/L N nas regiões centrais do aquífero Salitre nos municípios de Jussara, Central, Irecê, Uibaí, Gentio do Ouro, Lapão e João Dourado (Silva, 2005).

Para o cloreto já existiam, nos anos 60, teores elevados nas águas subterrâneas, chegando a índices de 600 mg/L na região de Central e Uibaí, municípios localizados na porção central da área. Nos municípios de Jussara, Irecê, São Gabriel, Central, Uibaí, Lapão, Ibititá e João Dourado, os valores de cloreto também se apresentaram elevados, coincidindo com a maior concentração de atividades agrícolas da região (Silva, 2005).

**Tabela 7.15 – Quantitativo de amostras com resultados analíticos superiores ao VMP (Portaria nº 2914/2011) para águas destinadas ao consumo humano.**

Parâmetro		STD	Dureza	Sulfato	Cloreto	Fluoreto	Nitrato	Ferro
Acima do VMP	Período Seco	62%	77%	15%	15%	0	69%	15%
		8	10	2	2	-	9	2
	Período Úmido	62%	69%	15%	31%	8%	77%	15%
		8	9	2	4	1	10	2

## 7.4 Avaliações isotópicas

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

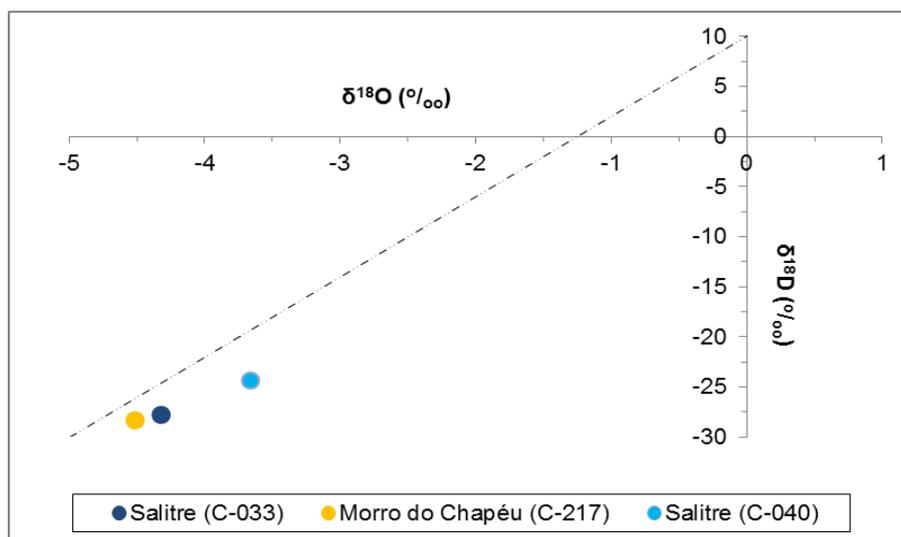
Foram coletadas 3 amostras de água subterrânea, na segunda campanha (período úmido), cujos os resultados são apresentados na Tabela 7.16.

**Tabela 7.16 – Resultados das análises de isótopos em água na bacia do Riacho do Juá.**

ID	Amostra	Município	Localidade	$\delta^{18}\text{O}$ (VSMOW) ‰	$\delta^2\text{H}$ (VSMOW) ‰	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
C-033	Salitre	Lapão	-	-4,32	-27,8	0,70851
C-040	Salitre	Uibaí	Olho D'água	-3,66	-24,4	0,70844
C-217	Morro do Chapéu	Uibaí	Balneário do Brejo	-4,51	-28,3	0,7368

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

Para o  $\delta^{18}\text{O}$  as razões isotópicas das análises variam entre de -4.51‰ a -3,66‰ e para  $\delta^2\text{H}$  oscilam de -28,3‰ a -24,4‰ (Tabela 7.16). Esses resultados foram plotados em gráficos  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  juntamente com a reta meteórica mundial (GMWL ou RMM) (Figura 7.78). A interpretação desses isótopos permite identificar partes do ciclo hidrológico e possibilitam o conhecimento da história da água (origem e processos de mudança de fase).



**Figura 7.78: Relação de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  das amostras. Linha tracejada corresponde a Reta Meteórica Mundial (RMM). Equação da reta:  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ .**

Os valores negativos indicam que as águas analisadas são empobrecidas em relação aos padrões VSMOW e sugere o “efeito da continentalidade” e o “efeito

da quantidade”, citados por Gat (1971), que marcam as águas meteóricas, cuja composição isotópica depende de uma série de fatores.

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

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

Na Figura 7.78 observa-se que as amostras apresentam composição isotópica próxima à da linha meteórica mundial (RMM), confirmando sua origem meteórica.

Para o aquífero Salitre, os resultados evidenciam um menor enriquecimento isotópico no poço localizado na faixa leste (C-033) quando comparado ao poço do setor oeste (C-040). Essa configuração evidencia um enriquecimento isotópico de leste para oeste, concordante com a direção preferencial do fluxo subterrâneo. Esse cenário já havia sido verificado em Villanueva *et al* (2014) considerando, inclusive, um número maior de amostras.

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

Os estudos utilizando isótopos de estrôncio evidenciam a importância de desses isótopos como indicadores da interação rocha água (Alemyehe *et al*, 2011). No Brasil, o uso dessa ferramenta em pesquisas hidrogeológicas ainda é escassa, podendo-se citar os trabalhos de Martins (2008), que utilizou isótopos de estrôncio como traçadores da recarga e contaminação de aquíferos na região metropolitana de São Paulo, e Maldaner (2010), que usou os isótopos de estrôncio como traçadores da origem das águas subterrâneas na cidade de Urânia/SP.

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

Nas águas superficiais, a composição isotópica de estrôncio é primeiramente controlada pelas rochas que elas percorrem, por sua composição química e idade (Banner, 2004). Já nas águas subterrâneas, a variação isotópica de estrôncio é semelhante das águas superficiais, refletindo idade e o tipo de rocha do aquífero, mas pode ser mais efetiva, já que a temperatura, pressão e forças iônicas são maiores em profundidade, além do que o tempo e a área de contato com a rocha, também, são maiores (Banner, 2004), promovendo

uma maior interação água-rocha. A água subterrânea adquire estrôncio durante a recarga e ao longo do fluxo hidráulico, conforme ela interage com os minerais presentes no aquífero (Gosselin *et al*, 2004).

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

Na área de estudos foram realizadas análises de isótopos de estrôncio na segunda campanha de amostragem (período úmido) nos pontos indicados na Tabela 7.16.

A razão de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  das águas do aquífero Salitre foi de 0,70851 (C-033) e 0,70844 (C-040), portanto, bastante próximas, evidenciando a mesma procedência para esse elemento. A amostra de água no aquífero pertencente a Formação Morro do Chapéu apresentou razão  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  da ordem de 0,7368 (C-217), superior ao aquífero Salitre devido às características mineralógicas essencialmente silicáticas da referida Formação. Fica evidenciado uma assinatura isotópica distinta para essas duas unidades amostradas.

## 7.5 Considerações finais

O aquífero Salitre na Bacia do Riacho do Juá apresenta águas de salinidade variada, com sólidos totais dissolvidos desde 500 mg/L até quase 3000 mg/L, portanto, classificadas como doces a ligeiramente salobras. O pH é levemente ácido a pouco alcalino e predominam as águas muito duras.

Para os parâmetros STD, cloreto, sulfato e dureza observa-se um crescimento dos teores de leste para oeste. Esse comportamento possivelmente está relacionado ao fluxo de água dentro do aquífero.

Nos setores de maior carstificação, que constituem as principais zonas de recarga, e conseqüentemente de maior circulação (faixa leste), as águas tendem a serem bicarbonatadas cálcica, passando a bicarbonatadas cloretadas cálcicas ao longo do fluxo subterrâneo e finalmente cloretadas cálcicas a cloretadas mistas nos setores de descarga, já nas proximidades dos afloramentos da formação Morro do Chapéu.

Do ponto de vista qualitativo, essas águas apresentam restrições ao consumo humano devido a teores elevados para os parâmetros STD, dureza, sulfato, cloreto, fluoreto, nitrato e ferro.

## 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 8.1.

Tabela 8.1 – 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

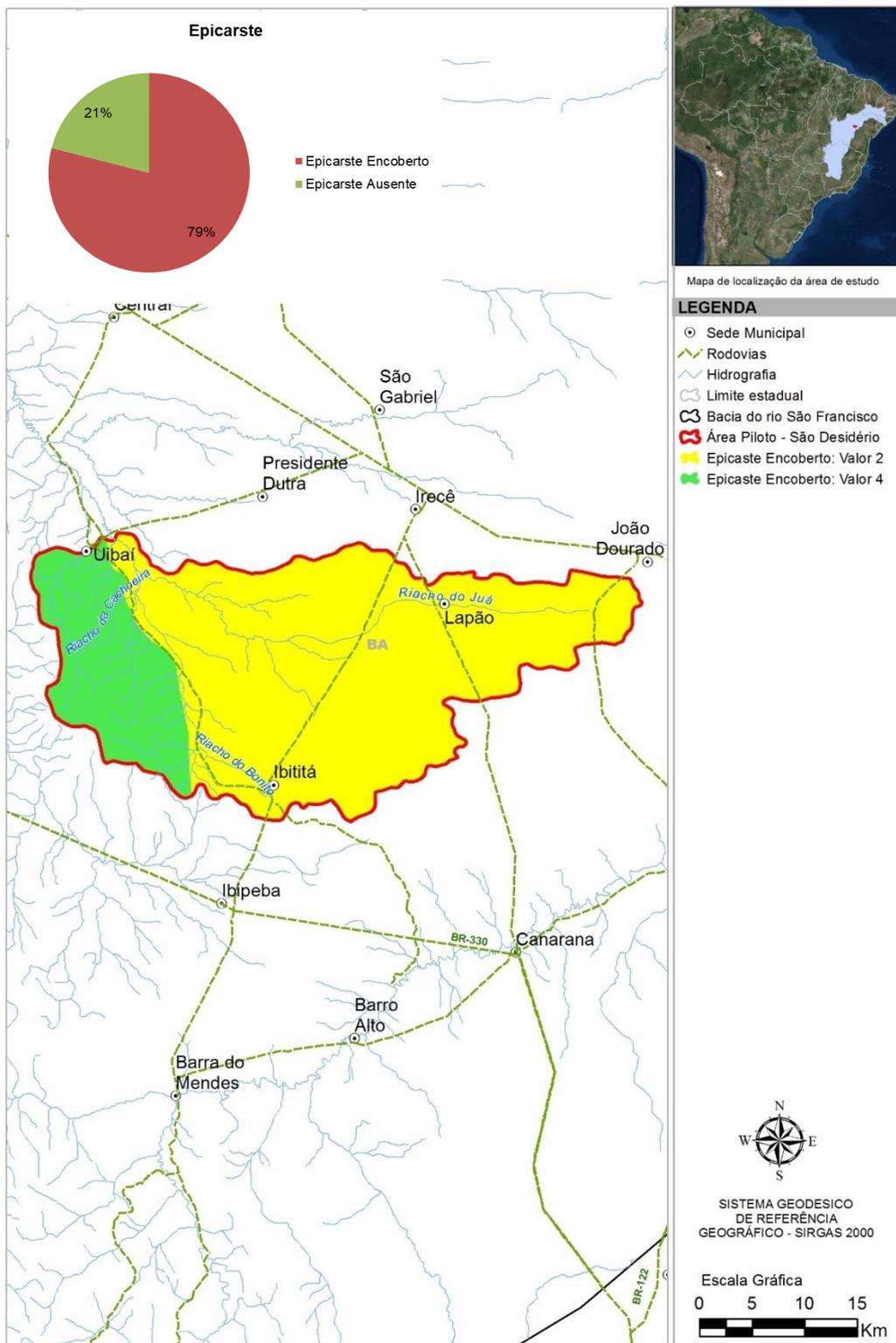
Assim sendo, o perigo de contaminação foi avaliado sobrepondo-se os resultados do cadastro de cargas contaminantes ao mapa de vulnerabilidade. Esta sobreposição informa sobre a distribuição das zonas onde há perigo de contaminação.

Foi criada, para tanto, uma base de dados que auxiliou na análise de todas as possíveis classificações atribuídas aos parâmetros E, P, I e K. Os dados utilizados serão descritos a seguir, juntamente com a descrição das classificações de cada parâmetro e o cruzamento das informações para geração do mapa de vulnerabilidade.

### 8.1 Classes do parâmetro Epicarste (E)

Para a atribuição de classes ao parâmetro E foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para se fazer a classificação desse parâmetro por unidade geológica, verificando em qual classe (E1, E2, etc) se enquadrava cada uma dessas unidades.

Como pode se observar na Figura 8.1, a classe epicarste encoberto domina na maior parte da área, totalizando 79% do total, enquanto que aos 21% restantes é aplicada a classificação de epicarste ausente e mostra a distribuição das duas classes atribuídas ao parâmetro Epicarste (E)



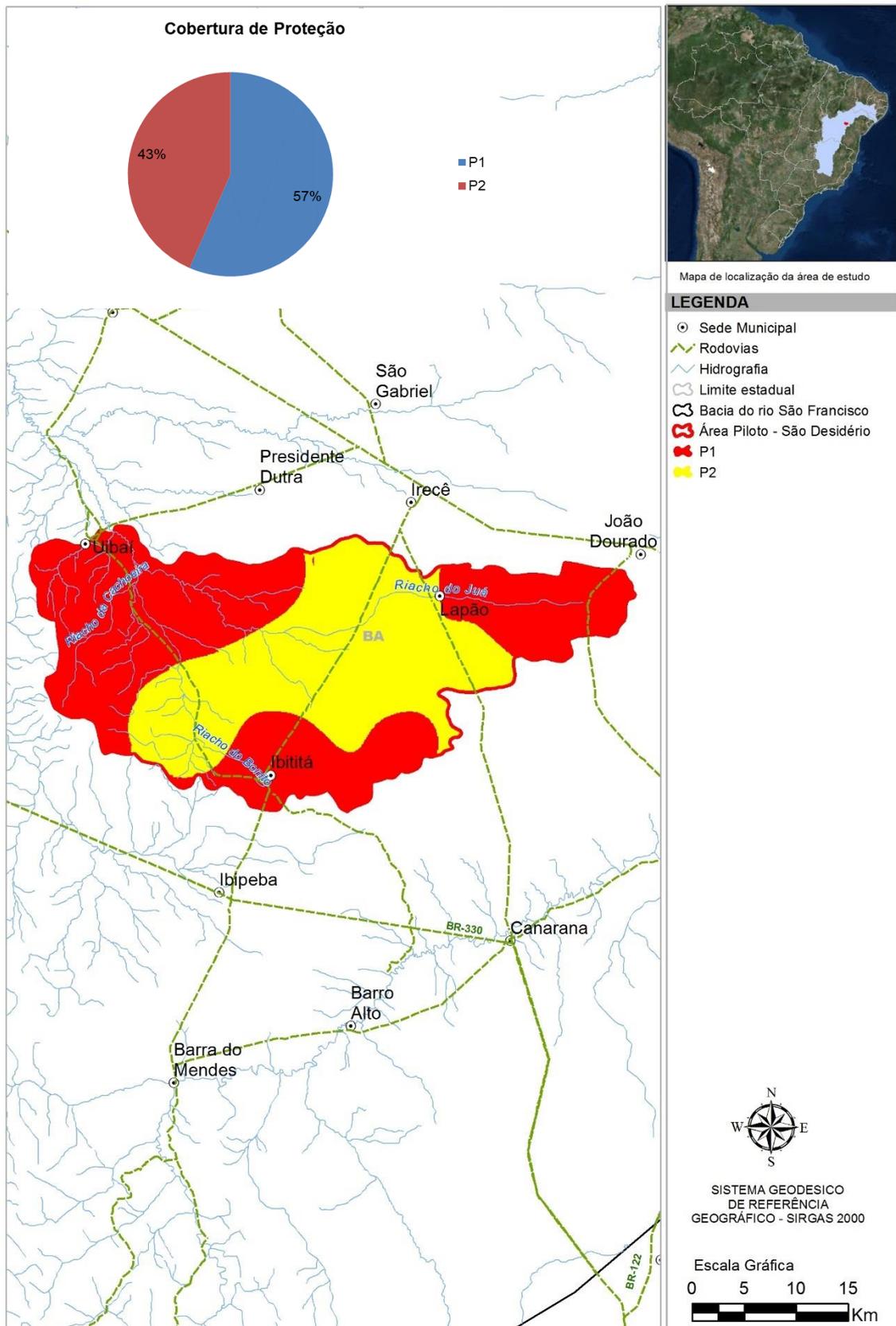
**Figura 8.1: Parâmetro E: Epicarste.**

## 8.2 Classes do parâmetro Cobertura de Proteção (P)

Para a atribuição de classes ao parâmetro P foram utilizados inicialmente os perfis litológicos de 203 poços perfurados na área regional de ocorrência da Formação Salitre, sendo 13 na área piloto. Esses perfis ofereceram informações sobre a litologia em variadas profundidades, o que foi suficiente para a classificação pretendida.

Para a obtenção de informações mais contínuas espacialmente, foi realizada uma interpolação espacial através do método designado de ponderação do inverso da distância (IDW). Foi obtida, assim, uma função contínua associando valores do parâmetro P a cada ponto do terreno. Foi obtido um recorte dessa função, interessando a área piloto, o que permitiu a espacialização de duas classes denominadas de P1 e P2.

Como pode se observar na Figura 8.2, a classe P1 ocorre em 57% da área piloto, enquanto que a classe P2 ocorre em 43% dessa área e mostra a distribuição das duas classes atribuídas ao parâmetro cobertura de proteção (P).

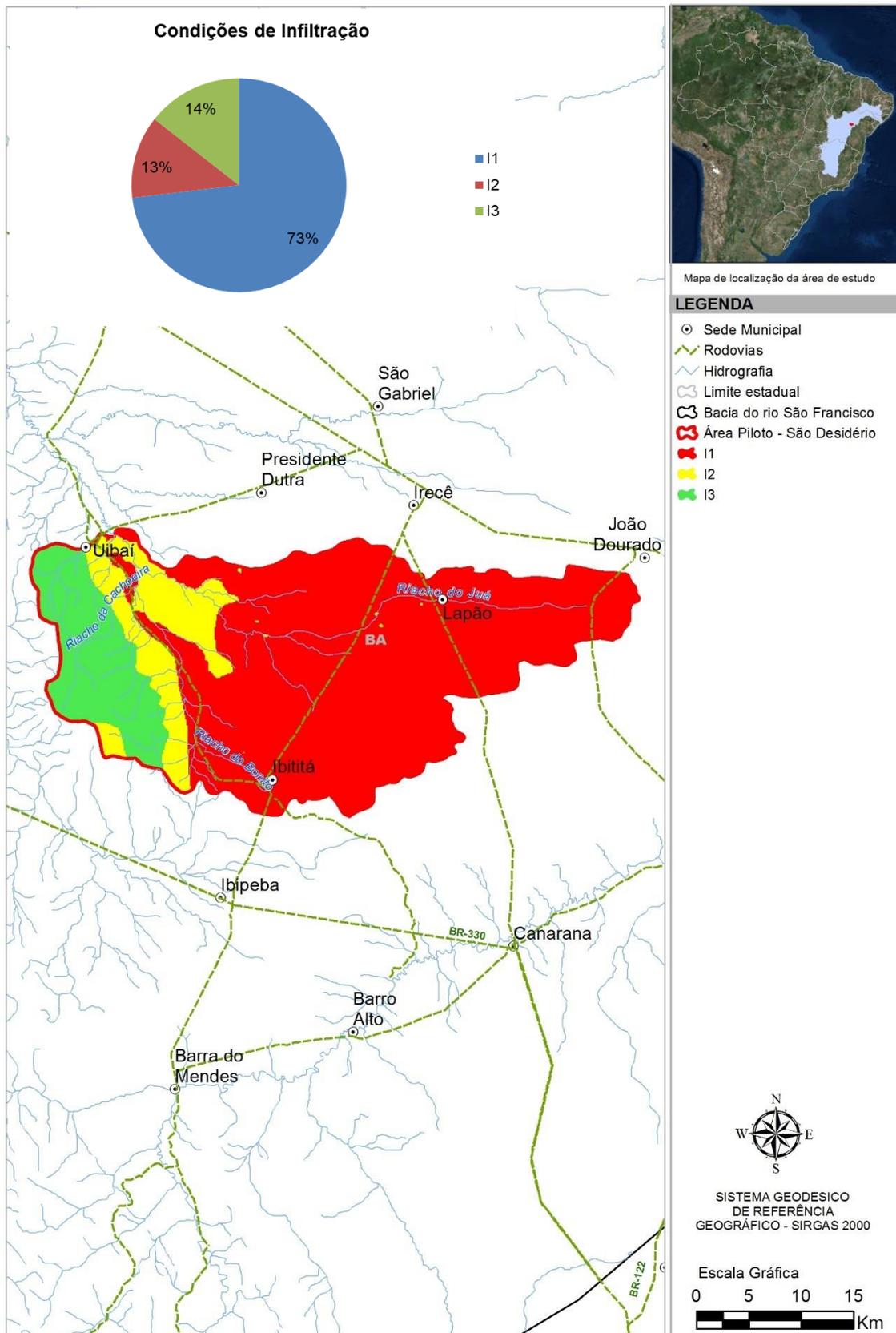


**Figura 8.2: Distribuição areal das classes do parâmetro P: cobertura de proteção.**

### **8.3 Classes do parâmetro Condições de infiltração (I)**

Para a atribuição de classes ao parâmetro I foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para fazer a classificação desse parâmetro por unidade geológica, verificando em qual classe (I1, I2, etc) se enquadrava cada uma dessas unidades.

Como pode se observar na Figura 8.3, a classe I1 domina na maior parte da área, totalizando 73% do total, enquanto que ao restante da área são aplicadas as classificações de I2 (menos de 13%) e I3 (14%) e mostra a distribuição das três classes atribuídas ao parâmetro condições de infiltração (I).

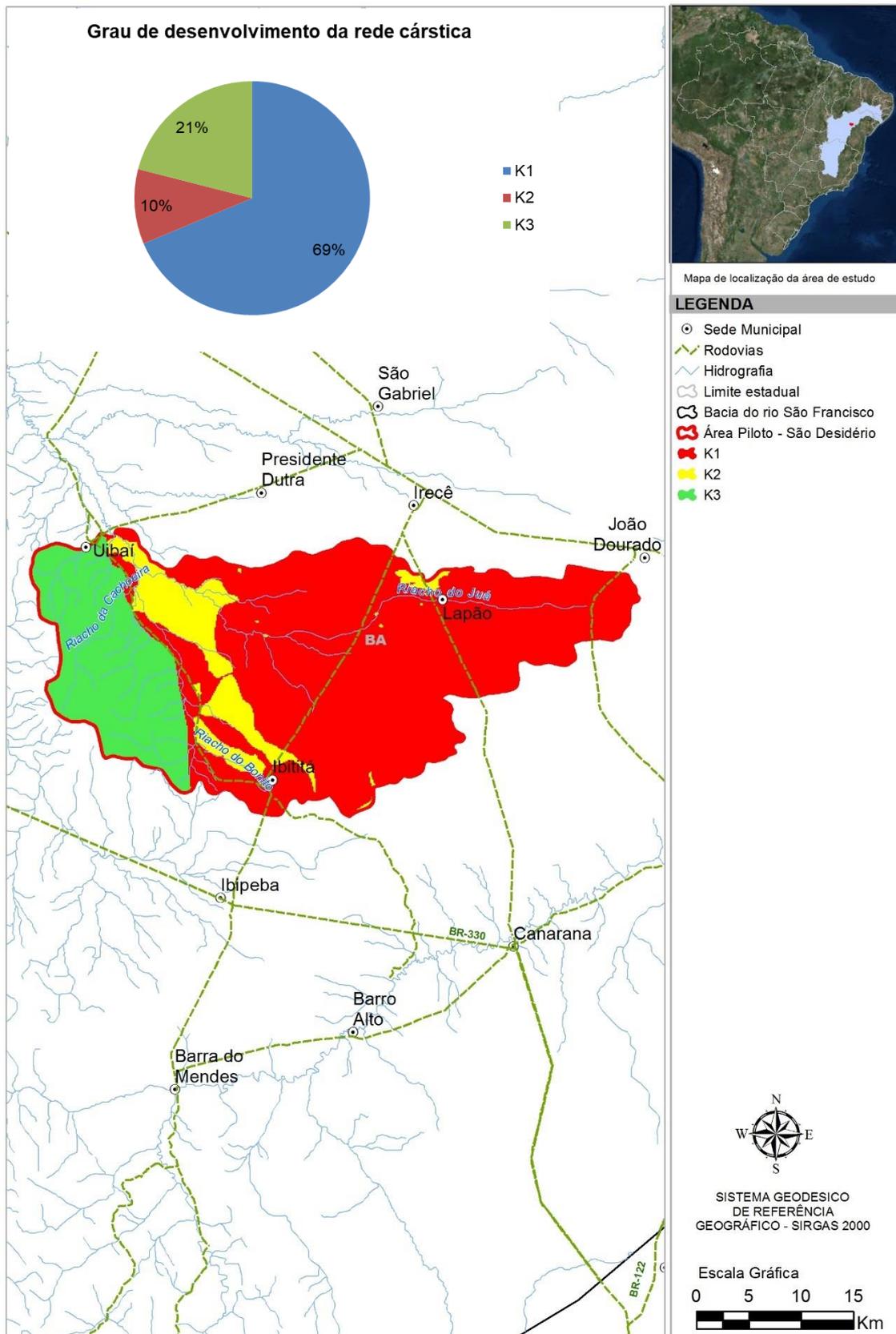


**Figura 8.3: Distribuição areal das classes do parâmetro I: condições de infiltração.**

#### **8.4 Classes do parâmetro Grau de Desenvolvimento da Rede Cárstica (K)**

Para a atribuição de classes ao parâmetro K foi utilizada a base geológica da CPRM. As informações contidas na tabela de atributos dessa base foram suficientes para fazer a classificação desse parâmetro por unidade geológica, verificando em qual classe (K1, K2, etc) se enquadrava cada uma dessas unidades.

Como se pode observar na Figura 8.4, a classe K1 domina na maior parte da área, totalizando 69% do total, enquanto que ao restante da área são aplicadas as classificações de K2 (10%) e K3 (21%) e mostra a distribuição das três classes atribuídas ao parâmetro desenvolvimento da rede cárstica (K).



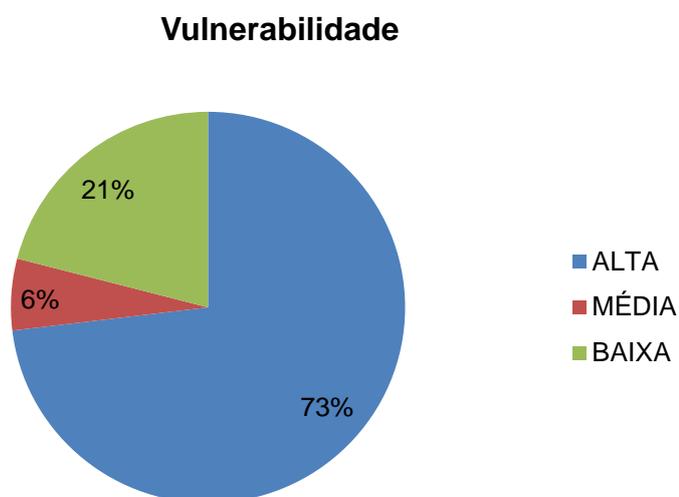
**Figura 8.4: Distribuição areal das classes do parâmetro K: grau de desenvolvimento da rede cárstica.**

## 8.5 Álgebra de mapas e cruzamento das classificações

Com os diferentes parâmetros zoneados, na área piloto, foi possível realizar o cruzamento das informações a fim de gerar o mapa de vulnerabilidade.

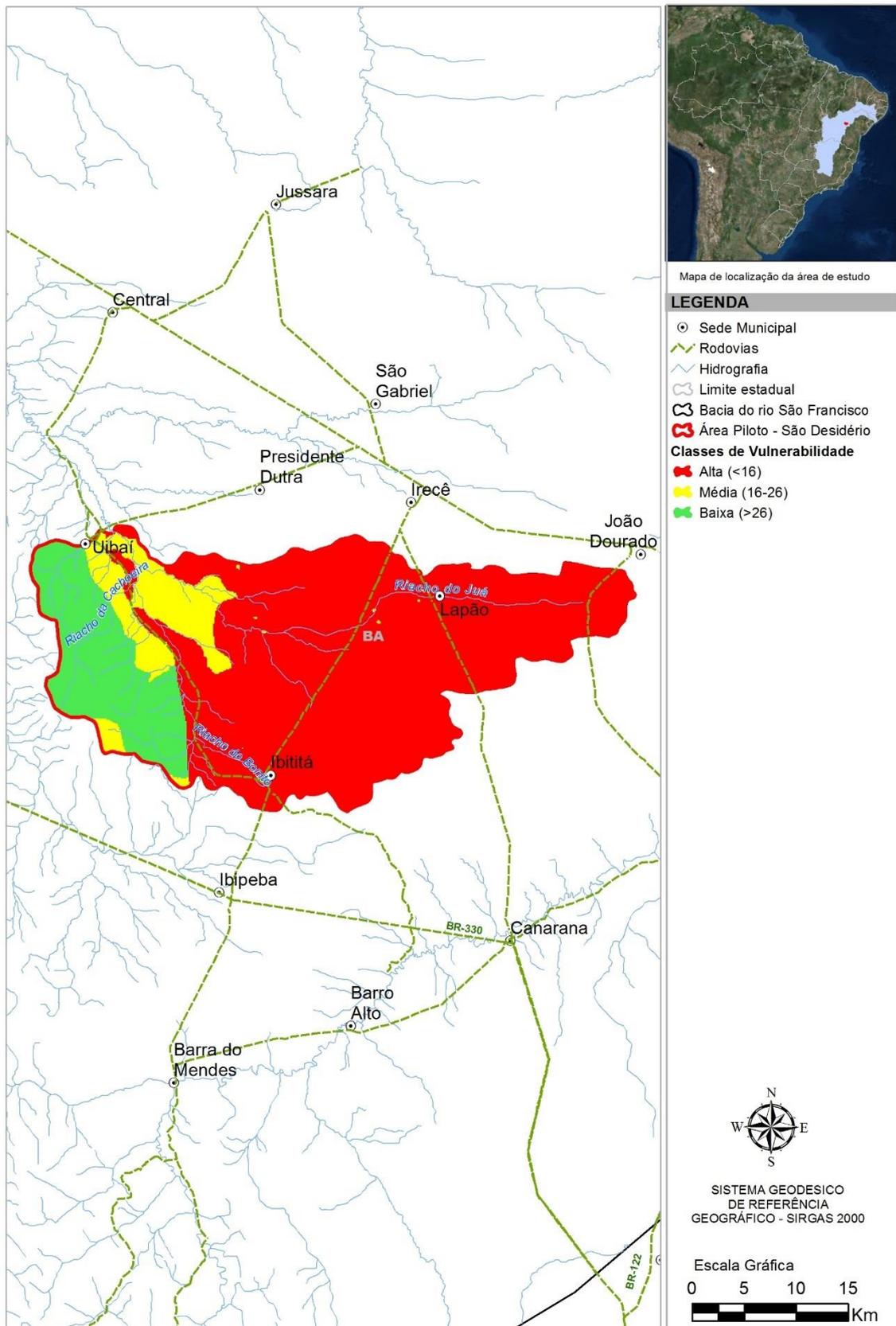
Seguindo os passos da metodologia, que considera pesos diferentes para cada parâmetro (3 para o E, 1 para o P, 3 para o I e 2 para o K), foi realizada a soma através da técnica álgebra de mapas. Foram definidas, dessa forma, áreas de vulnerabilidade classificadas como alta, média e baixa.

Na Figura 8.5 percebe-se que a classe de vulnerabilidade alta predomina, ocorrendo em 73% da área piloto. A classe de vulnerabilidade baixa ocorre em 21% dessa área, enquanto a classe de vulnerabilidade média caracteriza apenas 6%.



**Figura 8.5: Classificação da vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica do Riacho do Juá.**

O mapa da Figura 8.6 mostra a distribuição das três classes de vulnerabilidade que ocorrem na área piloto em estudo.



**Figura 8.6: Mapa de Vulnerabilidade – EPIK Adaptado para a área piloto da Bacia do Riacho do Juá.**

## 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 vulnerabilidade do aquífero à contaminação, o que depende das características naturais dos estratos que o separam da superfície do solo.

No âmbito dos 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:

- A carga contaminante aplicada ou potencialmente aplicável 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.

Assim sendo, o risco de contaminação da área piloto em estudo foi avaliado sobrepondo-se os resultados do cadastro de cargas contaminantes (Figura 9.2) ao mapa de vulnerabilidade (Figura 8.6). A sobreposição desses dois mapas resulta no mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação, mostrado na Figura 9.3.

A área piloto em estudo contém os centros urbanos dos municípios de Uibaí, Ibititá e Lapão, além de áreas menos expressivas de Irecê, Ibipeba, Presidente Dutra, João Dourado e América Dourada. A vulnerabilidade, como foi visto no capítulo anterior, é alta na maior parte desses municípios. Sendo assim, toda e qualquer ocorrência de fontes contaminantes de elevada intensidade acarreta alto perigo de contaminação (Tabela 9.1).

**Tabela 9.1 - Classificação do perigo à contaminação.**

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

Na Figura 9.2 pode-se observar que as fontes contaminantes estão espalhadas pelos centros urbanos da área piloto. Existe, com efeito, um grande número de postos de combustível e esgotamento sanitário, que são de elevado potencial de contaminação, além de cemitérios, de moderada carga contaminante.

Os municípios de Lapão e Ibititá têm praticamente todas as suas áreas incluídas na Bacia do Riacho do Juá, classificada como de vulnerabilidade alta. Essas áreas são, portanto, de extremo perigo de contaminação, já que contêm fontes de alto potencial contaminante em locais de alta vulnerabilidade (Figura 9.3). Em outros pontos da área piloto onde se têm lixões e lavoura temporária em locais de vulnerabilidade alta, o perigo de contaminação é também considerado como muito alto, bem como nas áreas onde existem cemitérios.

Na área de exposição das unidades litoestratigráficas da Formação Salitre (173 km<sup>2</sup> ou 18% da área total), as ocorrências de feições endocársticas, tais como sumidouros, que permitem uma recarga quase que imediata, há um aumento significativo do perigo de contaminação das águas subterrâneas.

Os trabalhos de campo mostraram que os sumidouros se apresentam frequentemente atulhados. Muitos deles são preenchidos com solo ou entulho, contendo galhos de plantas de pequeno ou médio porte, consequência das enxurradas de inverno. Outros vêm sendo usados para descarte indevido de lixo doméstico (Figura 9.1) nos povoados e fazendas.



**Figura 9.1: Sumidouro localizado no Povoado de Aguada Nova, município de Lapão: Destaque para o lixo que é descartado no local.**

O local apresentado na Figura 9.1, localizado na zona urbana de Lapão, corresponde a um sumidouro cercado por um muro com portão fechado, para impedir que a população utilize o local como depósito de lixo (Figura 9.4). Esse sumidouro tem como objetivo principal a destinação das águas pluviais, impedindo alagamentos nas ruas. Essas águas, entretanto, sempre carregam resíduos sólidos, como embalagens plásticas e laminadas.

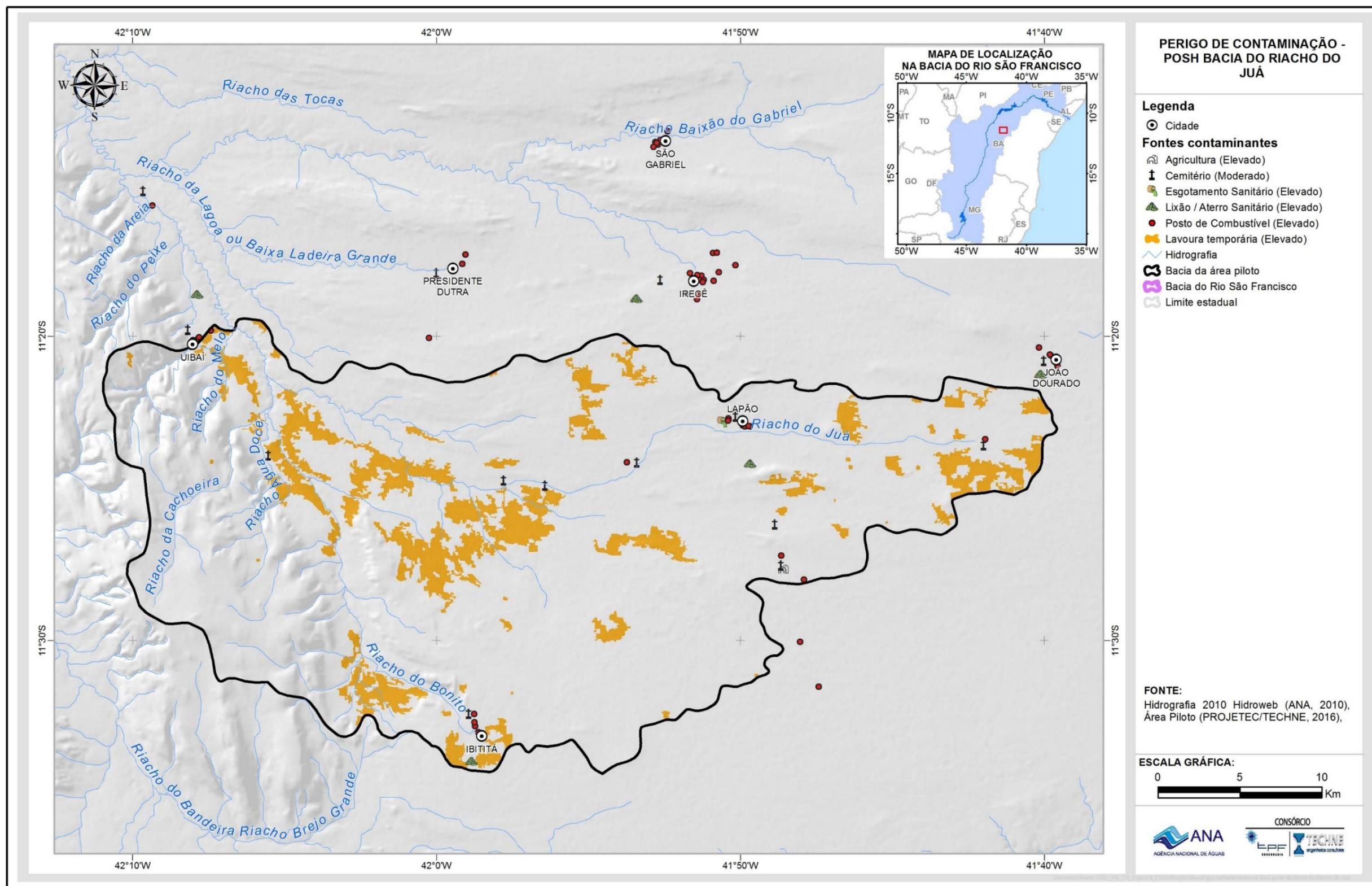


Figura 9.2: Distribuição das cargas contaminantes na área piloto da Bacia do Riacho do Juá.

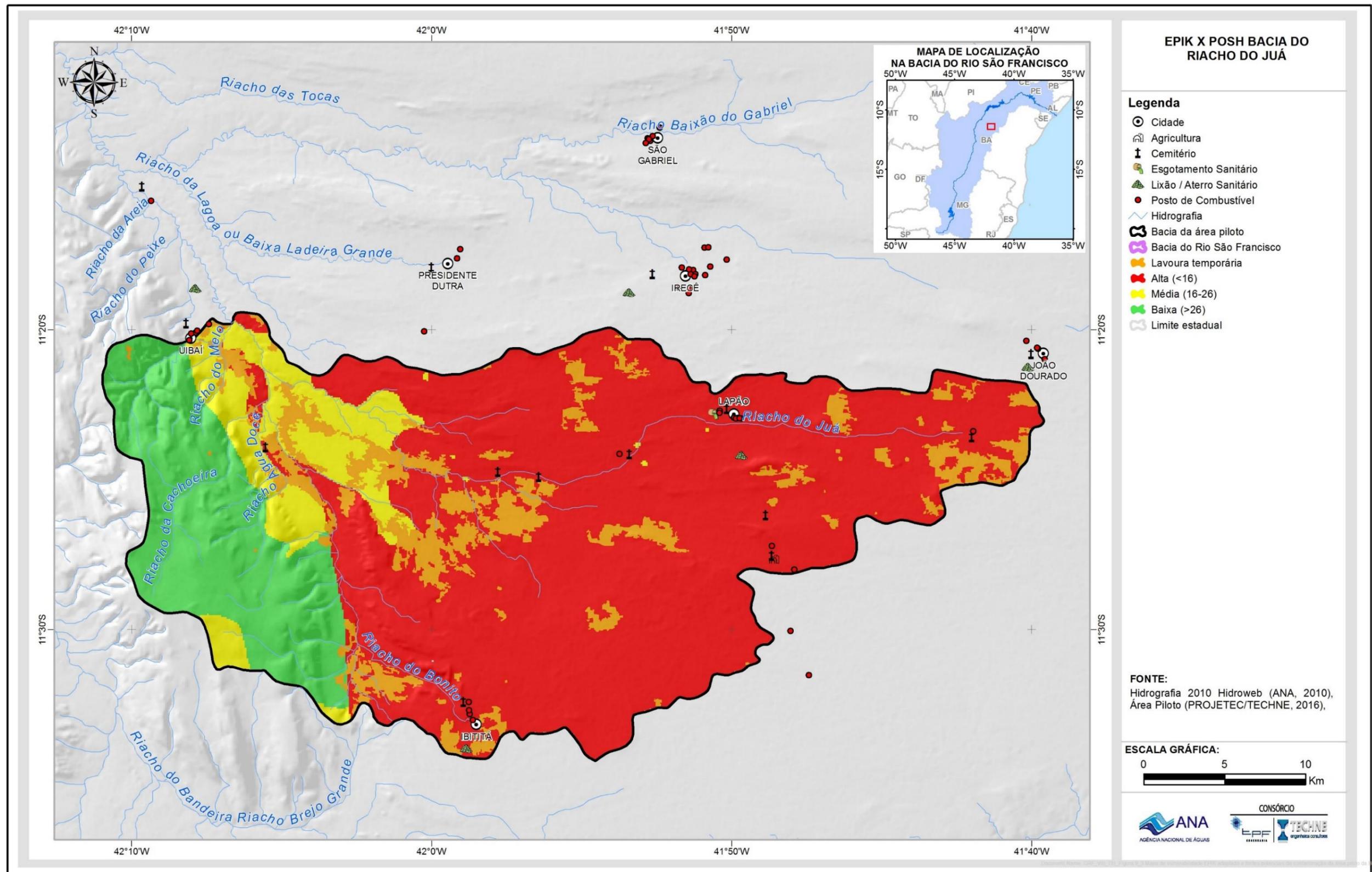


Figura 9.3: Mapa de vulnerabilidade EPIK adaptado e fontes potenciais de contaminação da área piloto da Bacia do Riacho do Juá.



**Figura 9.4: Sumidouro localizado na Rua José Vitor Carvalho. (a) Vista da área construída ao redor do sumidouro; (b) Manilha onde a água pluvial é escoada dos arredores até o local.**

A contaminação biológica decorrente de lixões, cemitérios e dejetos sanitários, ocorre por microorganismos que se proliferam durante o processo de decomposição. No caso de cemitérios, essa contaminação microbiológica envolve bactérias heterotróficas, proteolíticas, sulfitorredutores, enterovírus e adenovírus. A coleta de lixo é feita unicamente nos centros urbanos, sendo o material recolhido jogado às margens das rodovias (Figura 9.5). Nos povoados, o descarte e queima do lixo é feito aleatoriamente.

Os cemitérios dos municípios, por sua vez, apresentam uma estrutura padronizada. São cercados por muro de alvenaria, com áreas de acesso impermeabilizadas (Figura 9.6). No entanto, o acesso às sepulturas ainda é em terra batida. Os cemitérios dos povoados são de menor porte e, em sua maioria, limitados por cerca de arame farpado, não dispendo internamente de estrutura de impermeabilização nos corredores de acesso às sepulturas. A contaminação das águas subterrâneas, a partir dos cemitérios pode ocorrer por penetração da água da chuva nos túmulos, quer de alvenaria, quer simples covas rasas, e posterior percolação até o freático.



**Figura 9.5: Lixões na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. (a) JC-017P (Lixão Municipal, Ibititá), localizado km-35 da BA-148; (b), (c) e (d) Outras vistas do lixão, próximo a uma fazenda de irrigação; (e) e (f) JC-002P (Lixão Municipal de Lapão), localizado na margem esquerda da BA-432.**

No que diz respeito ao esgotamento sanitário, grande parte das casas do centro urbano dispõe de fossas sépticas. Chama a atenção uma obra de estação de tratamento de esgoto que prevê a utilização, no processo, de lagoas de decantação. Esta obra, entretanto, ainda inacabada e sem as devidas impermeabilizações, já recebe contribuição de esgotos (Figura 9.7), o que contribui efetivamente para a contaminação da água subterrânea.

Existem postos de combustíveis apenas nas proximidades das sedes dos municípios. São de estrutura pequena e sem ofertar nenhum outro serviço que não seja o de abastecimento (Figura 9.8). Em média, há apenas dois postos por município, sendo um no centro urbano e outro na periferia, às margens das rodovias, e, por vezes, nas imediações dos povoados. O município de Lapão é o mais bem servido, com dois postos no centro da cidade de Lapão e dois outros na rodovia Irecê-Lapão-Canarana, nas extremidades da área urbana.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 9.6: Cemitérios na área piloto da Bacia do Riacho do Juá. (a) Ponto JC-007P - Cemitério Colina da Saudade, localizado no município de Lapão; (b) Visão da parte central da área do Cemitério; (c). Ponto JC-030P - Cemitério Senhor do Bonfim (localizado na periferia do município de Ibititá, km 31 da margem direita da BA-148); (d) Cemitério pertencente ao Povoado de Poço, município de Uibaí; (e) e (f) Antigo Cemitério Municipal de Uibaí, localizado no centro urbano.**



(a)



(b)

**Figura 9.7: Estação de tratamento de esgoto do município de Lapão. (a) Composta por três piscinas sendo que, apenas uma não apresentava material; (b) Piscina contendo o material que é recolhido das casas e despejado no local.**



(a)



(b)



(c)



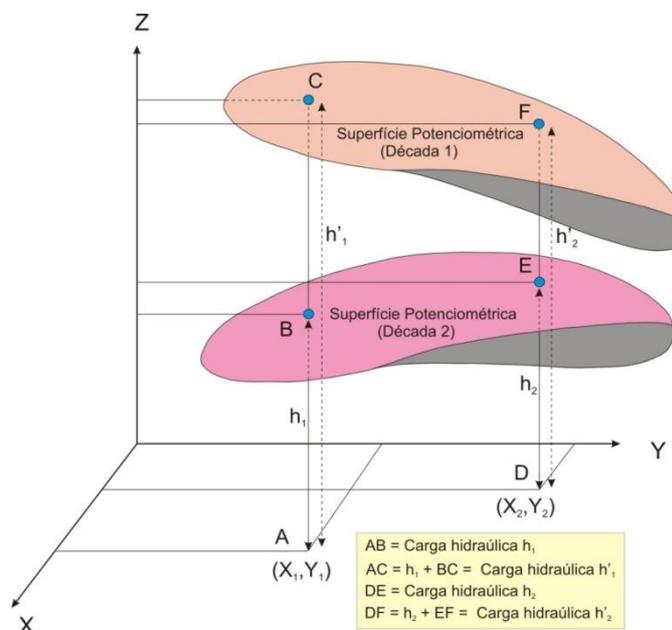
(d)

**Figura 9.8: Postos de combustíveis na Bacia do Riacho do Juá. (a), (b) e (c) - Ponto JC-031P (Auto Posto Bodão, Município de Lapão). Construção do Posto de gasolina cuja estrutura é bem comum em todos os empreendimentos deste tipo, presente na área de estudo. A fase de locação dos tanques de combustível no solo até sua finalização; (d) Ponto JC-021P (Mega Posto Avenida, localizado no município de Uibaí). Exemplo da estrutura dos Postos de gasolina mais antigos encontrado na área Piloto.**

## 10. Análise das cargas hidráulicas

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

Assim, para explorar os dados de carga hidráulica disponíveis, tentou-se uma análise alternativa, calcada na conceituação de superfície potenciométrica como uma função do tipo  $Z=f(x,y)$ . Segundo Feitosa & Filho (2008), superfície potenciométrica é “uma superfície, referida a uma dada profundidade, que inclui todos os pontos definidos por valores de cargas hidráulicas.” A concepção de superfície potenciométrica e da abordagem adotada é mostrada na Figura 10.1. Nesta figura, o plano XY deve ser considerado como um plano horizontal no seio do aquífero.



**Figura 10.1: Superfícies potenciométricas e abordagem adotada. Modificado de Feitosa & Filho (2008).**

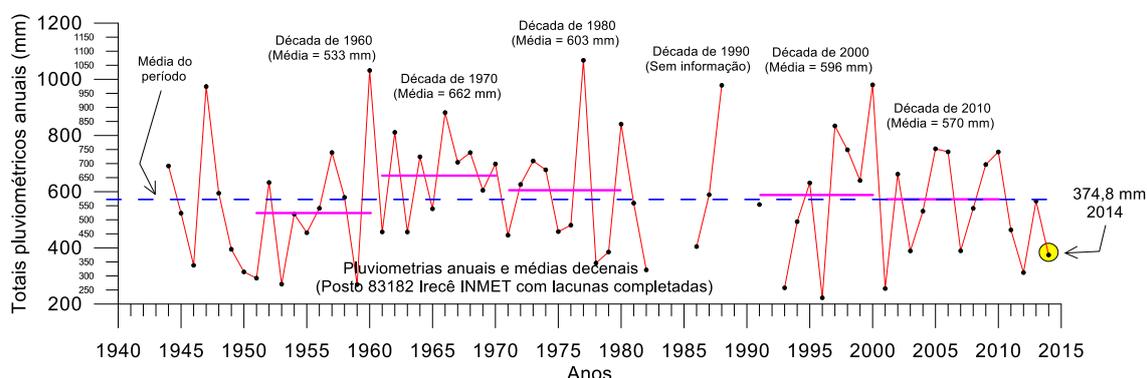
Na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, as cargas hidráulicas foram separadas por décadas para todo o carste. Foram aqui também consideradas, nessa separação, as datas de obtenção dos níveis estáticos dentro de cada década. Esses níveis foram medidos geralmente no teste de produção, realizado imediatamente após a perfuração do poço. Assim sendo, os poços considerados numa dada década não o foram na década anterior nem na seguinte. As cargas hidráulicas são, portanto, valores pontuais escalonados no tempo e no espaço, dentro da década considerada. Dentro de outra década têm-se outros valores pontuais nela escalonados, também no tempo e no

espaço. As superfícies potenciométricas representam, assim, o comportamento médio das cargas hidráulicas na área e na década considerada. Essas superfícies, na área piloto em análise, são recortes feitos a partir das superfícies potenciométricas regionais. Foram eleitas aqui, em função dos dados disponíveis, as superfícies potenciométricas referentes às cinco décadas seguintes<sup>14</sup>:

- Década de 1970 (1961 – 1970);
- Década de 1980 (1971 – 1980);
- Década de 1990 (1981 – 1990);
- Década de 2000 (1991 – 2000);
- Década de 2010 (2001 – 2010).

## 10.1 Série histórica de pluviometria

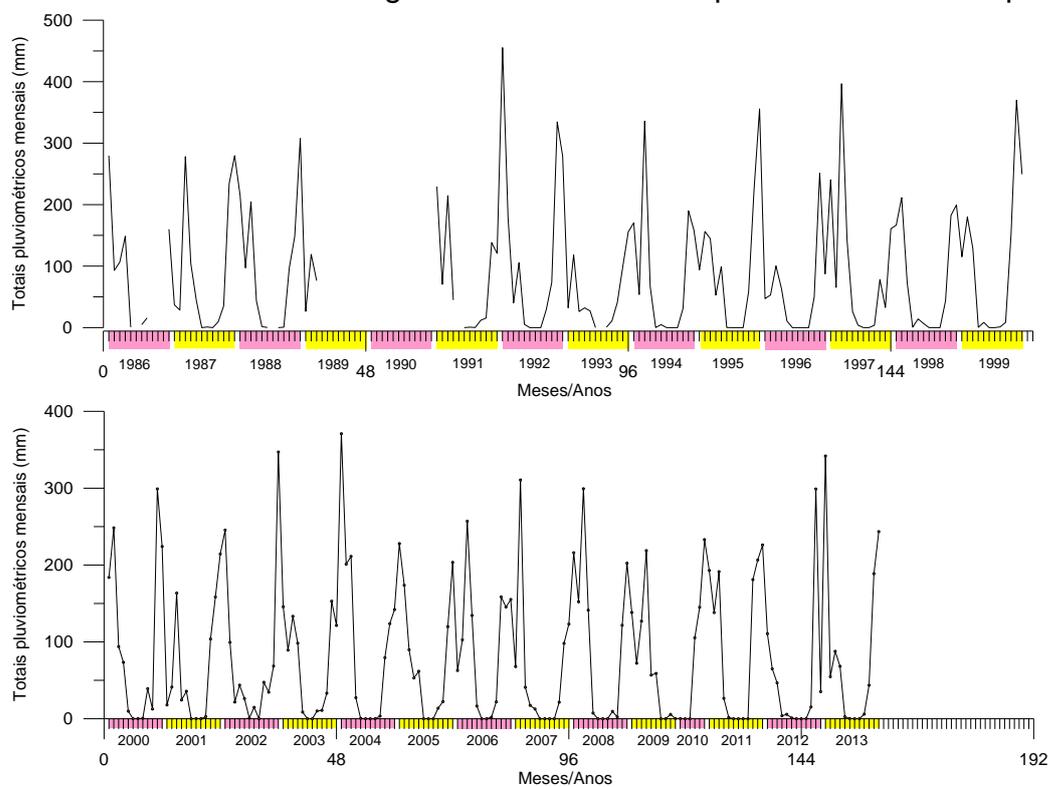
Foram levantados dados históricos de pluviometria para respaldar a análise da evolução das cargas hidráulicas. Esses dados foram obtidos do posto pluviométrico 83182 INMET, em Irecê, cujas lacunas foram preenchidas com o auxílio do posto 1141007, disponibilizado pelo portal Hidroweb. A série histórica de pluviometria é mostrada na Figura 10.2.



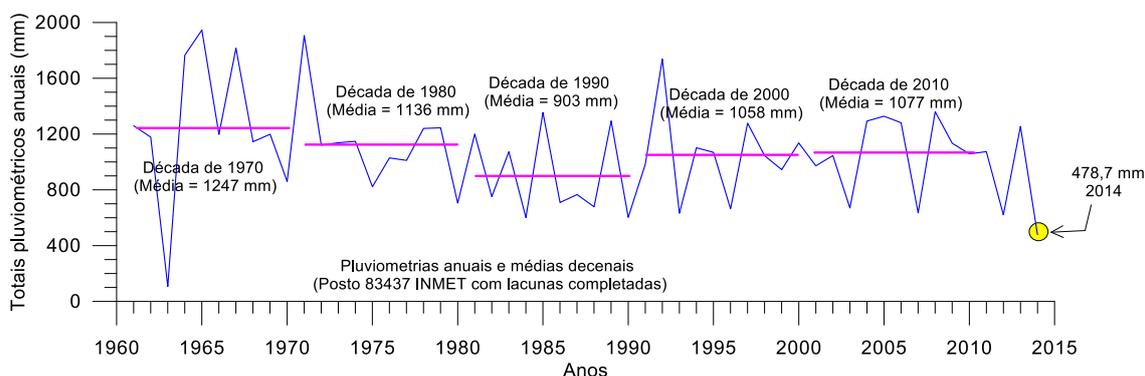
**Figura 10.2: Série histórica de chuvas anuais na estação 83182/INMET em Irecê (Fonte: INMET) e posto 1141007/Hidroweb).**

14 Por definição, no presente relatório, a superfície potenciométrica referente à década de 1980 é gerada a partir de todas as cargas potenciométricas obtidas entre 1971 e 1980. Análogamente, a superfície potenciométrica referente à década de 1990 é gerada a partir de todas as cargas potenciométricas obtidas entre 1981 e 1990. E assim sucessivamente.

Séries históricas de pluviometria como a mostrada acima na Figura 10.2 foram utilizadas na análise das cargas hidráulicas das demais áreas piloto (área piloto do rio São Desidério e área piloto do rio do Vieira). Essas séries históricas são mostradas abaixo nas figuras 10.3 e 10.4 para fins de comparação.



**Figura 10.3: Série histórica de chuvas anuais na estação 83236/INMET em Barreiras (Fonte: INMET).**



**Figura 10.4: Série histórica de chuvas anuais na estação 83437/INMET em Montes Claros (Fonte: INMET e posto 1643018/Hidroweb).**

As três séries históricas acima mostradas (Barreiras, Irecê e Montes Claros) oferecem uma amostragem do comportamento pluviométrico no âmbito do Carste São Francisco. As baixas pluviometrias nelas registradas a partir de 2010 apontam para o caráter regional da crise hídrica que vem afligindo a região há sete anos.

## **10.2 Diferenças entre as superfícies potenciométricas**

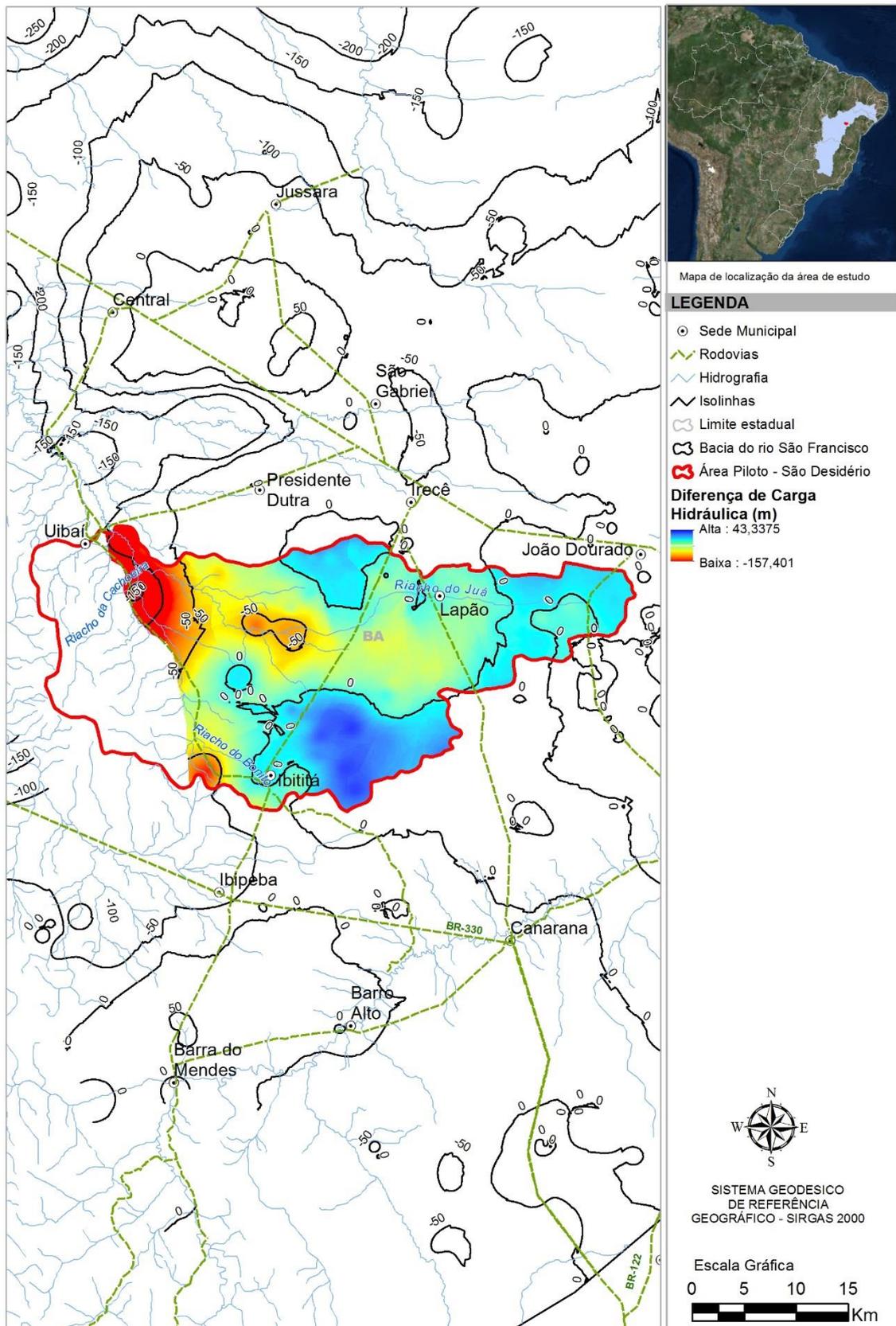
No presente relatório, foi calculada a diferença entre a superfície potenciométrica de cada década e a superfície potenciométrica da década imediatamente anterior (superfície da década 1980 menos a superfície da década 1970; superfície da década 1990 menos a superfície da década 1980, e assim sucessivamente). Cada diferença entre superfícies potenciométricas é representada por um conjunto de diferenças de carga hidráulica passível de zoneamento.

### **10.2.1 Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1970 - 1960**

Esse zoneamento é mostrado na Figura 10.5.

Ao longo da década de 1970 (1961 a 1970), as cargas hidráulicas médias na área piloto caracterizaram, em igual proporção, áreas de recuperação e áreas de rebaixamento, em relação à década anterior.

Na série pluviométrica (Figura 10.2) a década anterior – década de 1960 – está bem caracterizada como pouco chuvosa com pluviometria média abaixo da média da série. A década em foco – década de 1970 – por outro lado, foi muito chuvosa com pluviometria média bastante acima da média da série. Considerando a pronta resposta do carste às precipitações, acredita-se que devam predominar as recuperações dos níveis e que as zonas de rebaixamento sejam decorrentes de imprecisões da abordagem.



**Figura 10.5: Zoneamento das diferenças  $\Delta h$  1970 – 1960 (década de 1970).**

### **10.2.2 Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1980 - 1970**

Este zoneamento é mostrado na Figura 10.6. Ao longo da década de 1980 (1971 a 1980), confirma-se a tendência à recuperação dos níveis. Dominam agora valores positivos na maior parte da área piloto, com algumas áreas menos expressivas de valores negativos em suas bordas norte, sul e leste. Se a década anterior – década de 1970 – foi muito chuvosa, a presente década não lhe fica muito atrás (ver Figura 9.2). Assim, fica justificada a recarga quase generalizada observada na área piloto do riacho do Juá na década de 1980.

### **10.2.3 Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 1990 - 1980**

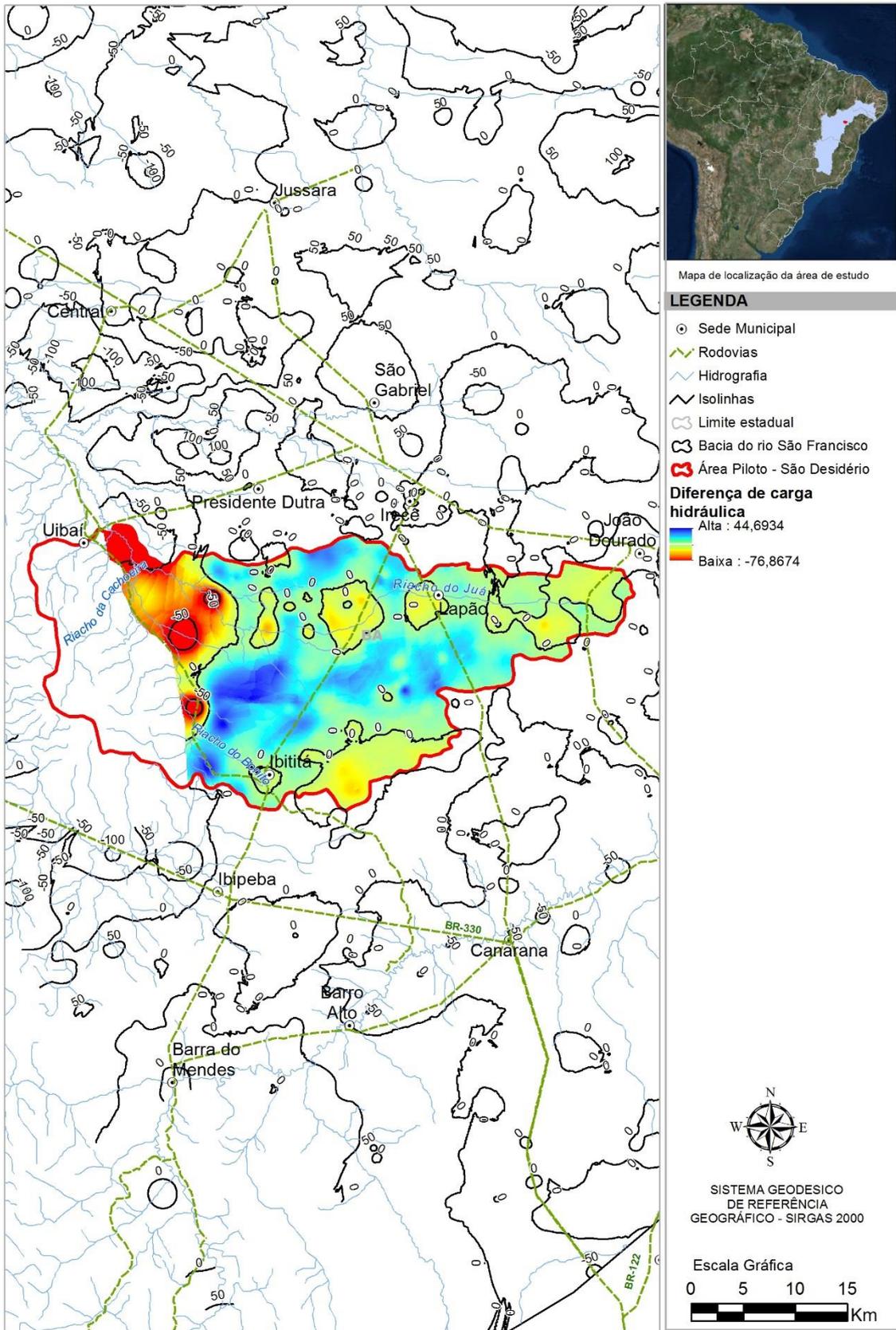
Este zoneamento é mostrado na Figura 10.7. Ao longo da década de 1990 instala-se uma situação de severa depleção do aquífero, isto é, um rebaixamento generalizado dos níveis em, praticamente, toda a área piloto. Ocorrem, entretanto, zonas localizadas de discreta recuperação dos níveis. Essas zonas talvez se expliquem, simplesmente, por imprecisões da abordagem utilizada. Nesta década de 1990 a série histórica de chuvas (Figura 10.2) tem severas lacunas, de modo que não se pode dizer muito sobre esse comportamento.

### **10.2.4 Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 2000 - 1990**

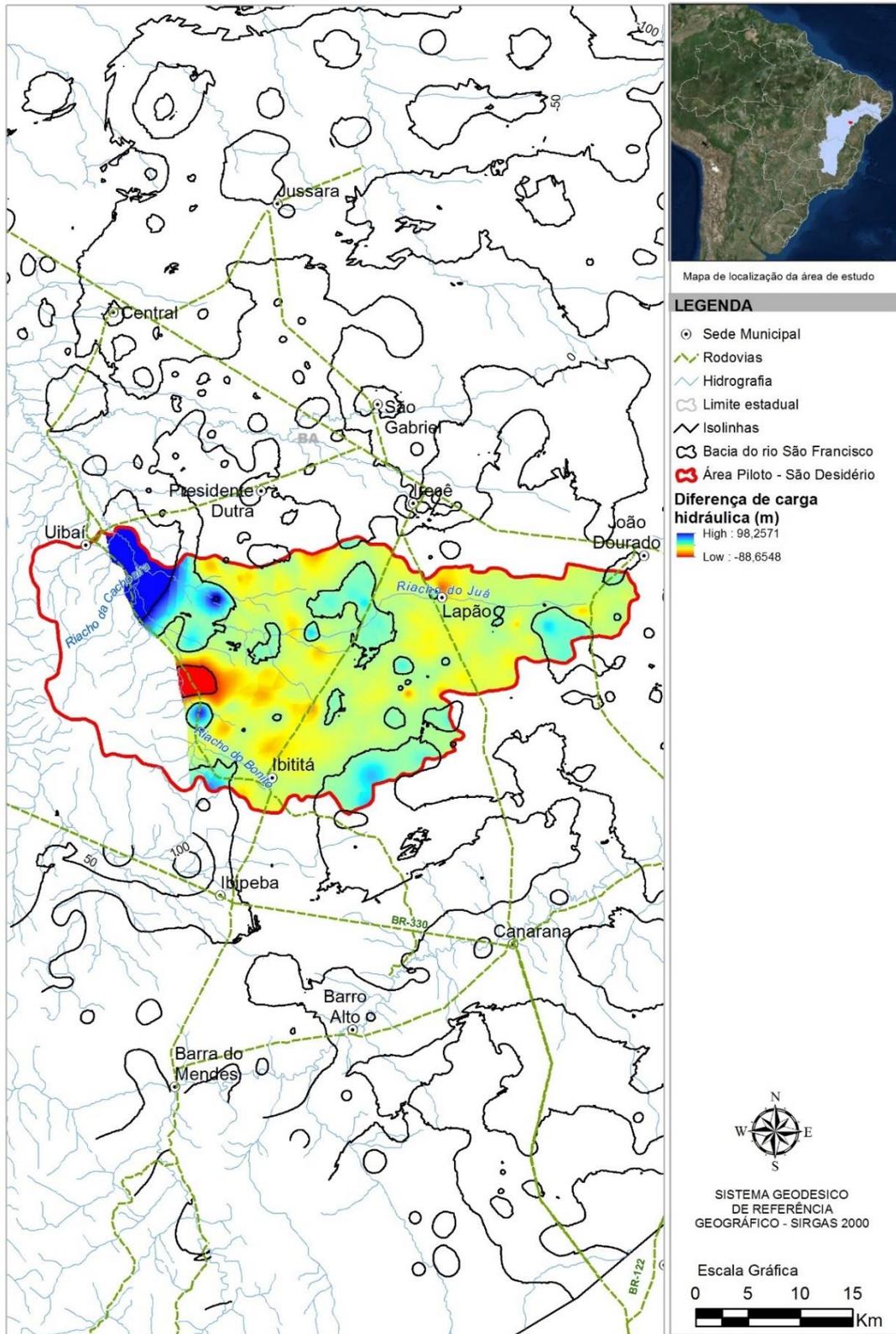
Este zoneamento é mostrado na Figura 10.8. Ao longo da década de 2000 os níveis continuam rebaixando em, praticamente, toda a área piloto. Subsistem zonas localizadas de discreta recuperação, não forçosamente coincidentes com as da década anterior.

### **10.2.5 Zoneamento das diferenças $\Delta h$ 2010 - 2000**

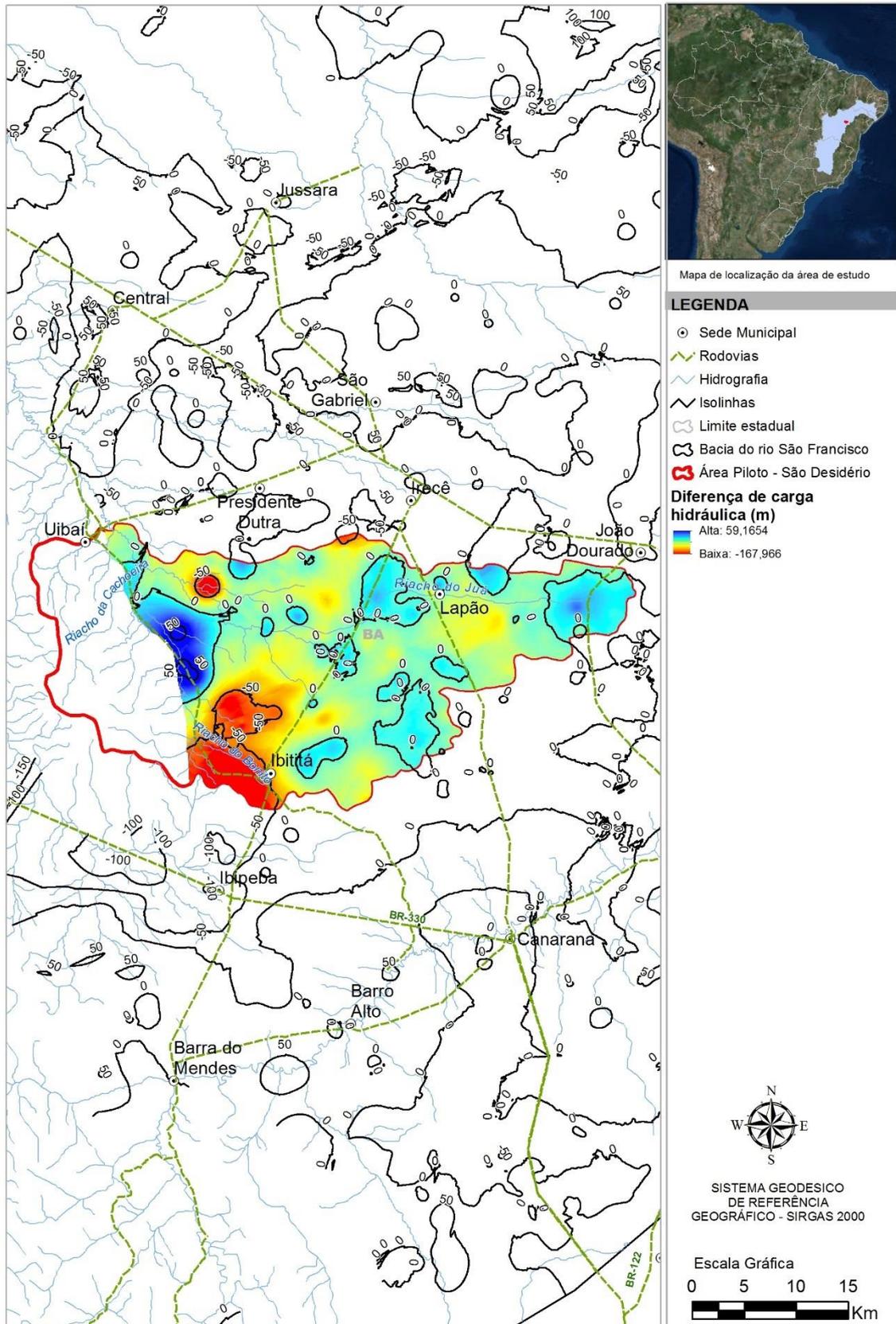
Este zoneamento é mostrado na Figura 10.9. Finalmente, ao longo da década de 2010 (2001 a 2010), o zoneamento das diferenças de carga hidráulica mostra que os rebaixamentos de nível nos calcários Salitre se mantêm, tal como vinha acontecendo nas duas décadas anteriores. Novas zonas de recarga, localizadas, se manifestam, desta feita com maior expressividade, porém sem outra explicação que não sejam imprecisões da abordagem.



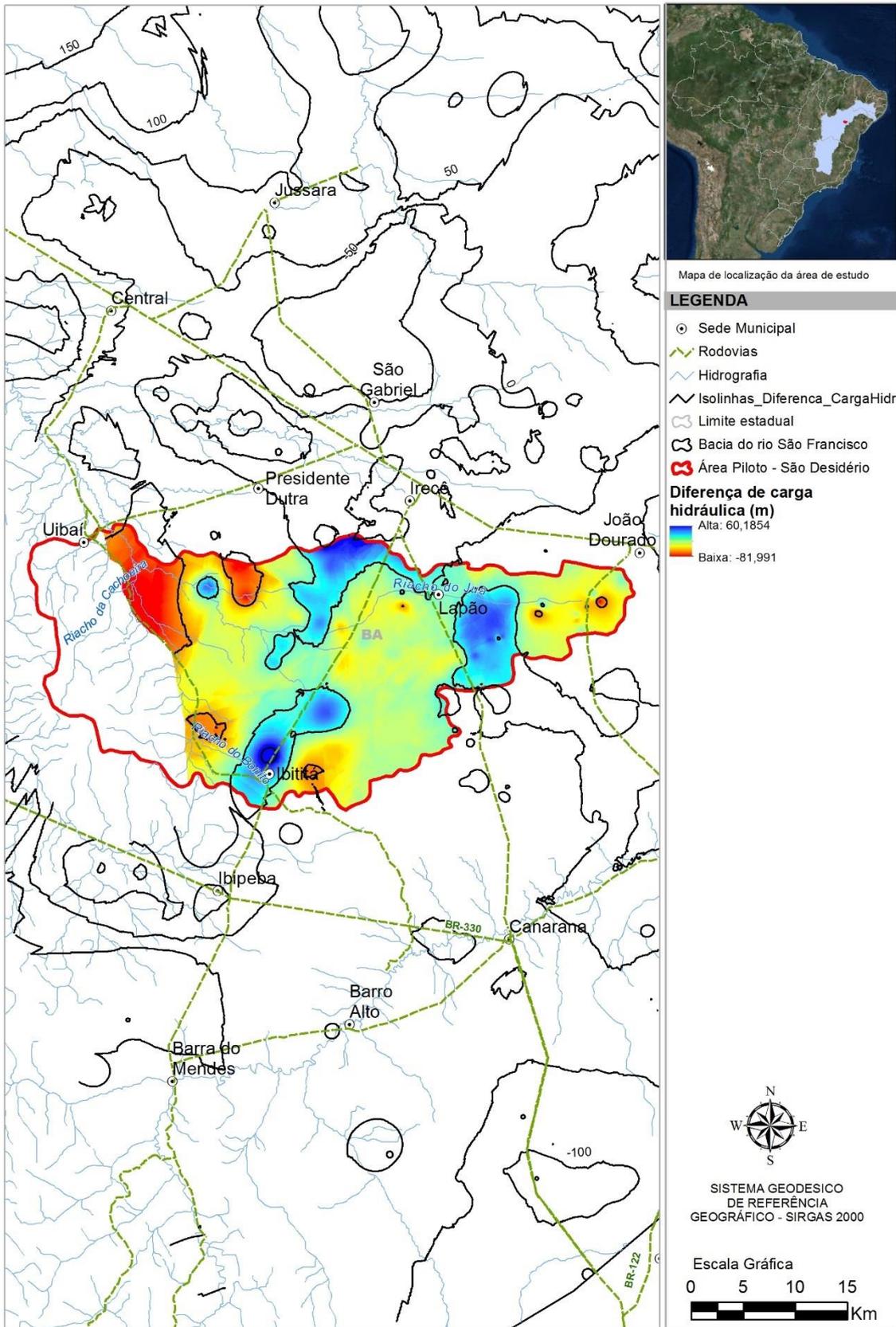
**Figura 10.6: Zoneamento das diferenças  $\Delta h$  1980 – 1970.**



**Figura 10.7: Zoneamento das diferenças  $\Delta h$  1990 – 1980.**



**Figura 10.8: Zoneamento das diferenças  $\Delta h$  2000 – 1990.**



**Figura 10.9: Zoneamento das diferenças  $\Delta h$  2010 – 2000.**

As variações das superfícies potenciométricas decenais, na área piloto da Bacia do Riacho do Juá, se revelaram menos coerentes, em suas relações década a década com a pluviometria, que no carste São Francisco como um todo.

Em linhas gerais, entretanto, verifica-se que o armazenamento de água subterrânea no Aquífero Salitre acompanha as flutuações de longo termo da pluviometria, como a seguir indicado:

- Na década de 1970 os níveis estavam regionalmente rebaixados, em decorrência da década anterior com déficit de chuvas (Figura 10.2). A década de 1960, aliás, foi a década mais seca dos últimos 60 anos;
- Na década seguinte, de 1980, os níveis surgem bastante recuperados, em resposta às altas pluviometrias da década anterior e às pluviometrias razoáveis da própria década. A década de 1970 foi a década mais chuvosa dos últimos 50 anos. Ela, juntamente com as chuvas da década de 1980, levaram o Aquífero Salitre a uma situação de plenitude única no período analisado;
- A partir da década de 1970 as pluviometrias decenais passam a decair lenta, mas continuamente, culminando nos baixíssimos valores atuais que prometem caracterizar uma crise hídrica em tudo análoga à da década de 1960. Na década de 1990, as cargas hidráulicas já se apresentam menores que na década anterior. A partir da década de 1990 as cargas entram numa fase de contínuo rebaixamento, mantendo-se assim até hoje, e caracterizando uma lenta e prolongada depleção das reservas aquíferas do Aquífero Salitre, agravada, naturalmente, pela descarga global de bombeamento.

As reservas hídricas subterrâneas dos terrenos cársticos, assim, são submetidas a flutuações de longo termo intimamente atreladas às flutuações da pluviometria. Acredita-se não ser demasiado ousado dizer que os rebaixamentos dos níveis de bombeamento na bacia de Irecê sejam devidos, em sua maior parte, às vicissitudes climáticas por que passa a região, desde a década de 1990. Esses rebaixamentos são, naturalmente, agravados pelos intensos bombeamentos.

## 11. Risco geotécnico

De acordo com Alheiros (1996), “não há unanimidade conceitual na bibliografia internacional sobre risco geológico; os termos *hazard* (perigo ou ameaça) e *risk* (risco), são por vezes utilizados como sinônimos e comumente, se fala em risco geotécnico ou risco geomorfológico, como sinônimos de risco geológico. Perigo e risco são termos intimamente relacionados. Enquanto o primeiro refere-se à probabilidade de ocorrência de um desastre, o segundo expressa as conseqüências em termos de danos e perdas de vidas, propriedades e serviços, caso esse desastre venha a ocorrer”.

O carste é constituído por terrenos formados por rochas carbonáticas, onde a circulação da água favorece a dissolução da rocha, com formação de condutos e cavernas nos maciços normalmente associados a um grande número de feições típicas em superfície. Dentre as feições geomorfológicas características

do carste estão as depressões fechadas, que representam áreas rebaixadas, circulares a elípticas, cuja drenagem é capturada para dentro de seus limites. O relevo negativo denota a existência de vazios em profundidade, em forma de fissuras, fendas, condutos, ou cavernas, que causaram a movimentação das camadas superficiais de solo ou rocha em direção à subsuperfície.

A movimentação desse material pode ser lenta e gradual ocasionando subsidência do terreno, ou, em certas circunstâncias, ocorrer de forma repentina, caracterizando um fenômeno de colapso cárstico. Esses movimentos de afundamento podem gerar trincas e fendas na superfície do solo ou da rocha, e ainda crateras profundas. É comum que as movimentações de terra sejam acompanhadas de estalos ou mesmo estrondos, caracterizando pequenos abalos sísmicos.

Esse processo geomorfológico natural tem seu ritmo associado a um grande número de variáveis, como constituição química da rocha, condições climáticas, características estruturais do maciço, tipo da cobertura do solo, qualidade da água infiltrada. Mudanças naturais nesses processos ou mesmo mudanças decorrentes de intervenções antrópicas no sistema cárstico podem afetar as taxas de dissolução e a estrutura dos solos associados às rochas carbonáticas carstificadas e assim acelerar o desenvolvimento das depressões fechadas.

No Brasil, alguns fenômenos de subsidência e colapso cárstico semelhantes aos descritos na região de Lapão ocorreram em áreas habitadas, trazendo prejuízos às edificações e também à população. Uma lista desses acidentes é apresentada por Sallun Filho (2009). Em 1986, na área urbana de Cajamar (SP) casas foram tragadas por uma cratera, enquanto recalques e trincas afetaram dezenas de outros imóveis até distâncias de 400 metros do local. Em março de 1988, no município de Sete Lagoas (MG) região metropolitana de Belo Horizonte, um afundamento de cerca de 20 metros de diâmetro e 5 de profundidade causou danos aos muros e arquibancadas do Estádio Municipal, e paredes de edificações próximas, sendo que, sinais de movimentação foram observados em edificações situadas em um raio de 40 metros. Outros casos de fenômenos de abatimento que ocasionaram danos em áreas urbanas no Brasil foram registrados em 1992 e 2007, no município de Almirante Tamandaré, região metropolitana de Curitiba, em 1999 em Teresina, no Piauí, e em 2007 no município de Bocaiúva do Sul, no estado do Paraná.

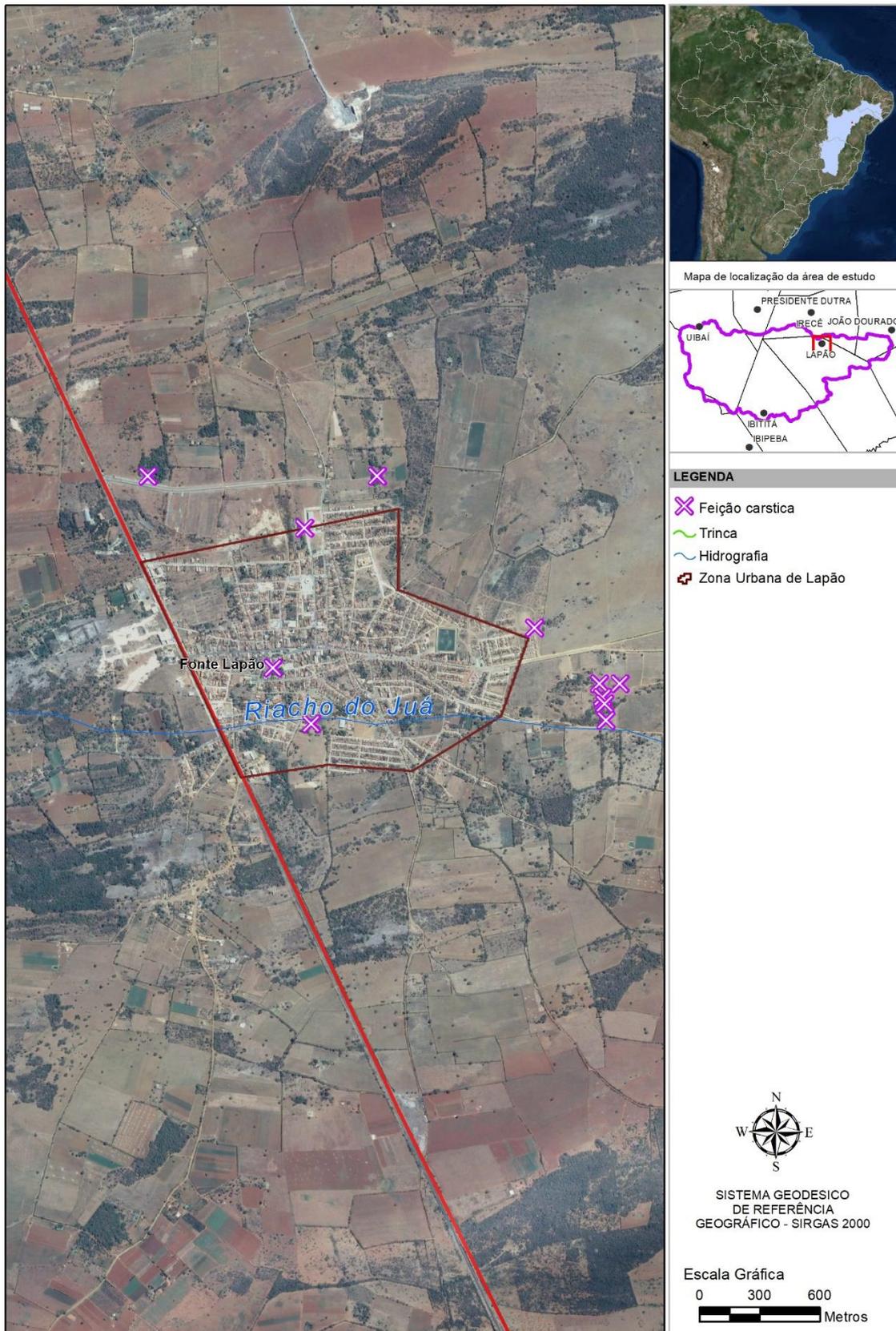
Mesmo sendo os processos de subsidência e colapso cársticos fenômenos naturais, a ocupação urbana, bem como a intervenção na dinâmica hídrica em regiões cársticas e em seu entorno, pode acelerar, ou mesmo desencadear, o aparecimento na superfície de depressões fechadas, acompanhadas por tais fenômenos. Esses fenômenos podem ocasionar acidentes, quando existem consequências sociais e/ou econômicas relacionadas diretamente ao fato. A investigação das causas dos processos de subsidência e colapso cárstico se torna muito importante para a tomada de medidas remediadoras e também medidas de precaução para a diminuição dos riscos de novos acidentes.

Apesar de a dinâmica cárstica ser relativamente bem conhecida, e serem muitos os relatos de acidentes envolvendo fenômenos cársticos, o entendimento das causas reais de um determinado acidente é uma tarefa

árdua, e muitas vezes o resultado da investigação pode ser inconclusivo. A ausência de um conhecimento prévio das condições do carste, bem como da dinâmica da água no ambiente, dificulta a análise. Além disso, os processos naturais se desenvolvem em cadeias não lineares, e não são previsíveis todas as interações possíveis.

Por outro lado, também é comum durante a investigação identificar um ou mais fatores claros e agravantes que atuam no sentido de acelerar os processos de dissolução, ou que alteram de alguma forma o estado de equilíbrio do maciço carstificado ou do solo que o recobre. Nesses casos, a ação imediata de controle desses fatores pode reduzir, em muito, os riscos associados a novos fenômenos de subsidência e colapsos cársticos.

Ao longo das últimas décadas o município de Lapão chamou atenção da população e dos órgãos públicos pelo aparecimento de trincas e abatimentos do solo em áreas rurais e urbanas, algumas com danos em construções (Figura 11.1). Ocorrências semelhantes foram relatadas em municípios próximos como João Dourado, Ibipeba e Barro Alto. As feições observadas foram associadas a fenômenos de subsidência e colapsos típicos do desenvolvimento geomorfológico de áreas cársticas (ver item 5.2.2).



**Figura 11.1: Feições cársticas mapeadas em Lapão.**

A proposta desse estudo é apresentar uma análise e propostas de gestão dos fenômenos envolvidos no aparecimento das trincas nas casas, rachaduras no solo, subsidências de terrenos e colapsos na região de Lapão e entorno, observando tanto o contexto geológico natural como as implicações decorrentes da ocupação do carste.

A análise será baseada em: (i) conhecimento da dinâmica típica de áreas cársticas; (ii) entendimento das propriedades específicas do carste no contexto regional - a bacia sedimentar de Irecê – e no contexto local, na Bacia do Riacho do Juá, na qual o município de Lapão está parcialmente inserido; (iii) revisão dos estudos existentes que abordam as possíveis causas dos fenômenos cársticos registrados em Lapão.

Esses três temas foram articulados para indicar os principais fatores que favorecem os fenômenos cársticos na região de Lapão e apontar quais são os fatores ainda não conhecidos que podem ser relevantes para a discussão dessa questão, orientando o desenvolvimento de novos estudos.

### **11.1 Metodologia**

A abordagem que foi utilizada na análise da problemática de Lapão envolveu uma consulta ao conjunto de trabalhos publicados e a realização de um estudo geológico e geofísico detalhado. Neste último, apresentado e discutido no item 5.2.2 do presente relatório, foi adotado o método de eletrorresistividade.

Ocorrências de fenômenos cársticos têm sido registradas com frequência em Lapão. A população e os órgãos públicos temem os riscos de acidentes e a inviabilidade do crescimento e/ou manutenção dos núcleos populacionais e das atividades econômicas que sustentam os municípios. De fato, a ocupação de áreas sujeitas a fenômenos cársticos exige um conhecimento profundo acerca das condições do subsolo e dos demais fatores que interagem de forma a acelerar ou estabilizar os processos por trás do aparecimento desses fenômenos.

Na dinâmica de formação e desenvolvimento de relevos cársticos a circulação da água é o fator dominante, já que é o processo responsável pela erosão e transporte de massa consumida dos maciços rochosos, incrementando os espaços de fluxo da água no interior desses maciços. Sobre esse aspecto, as propriedades químicas e físicas das águas circulantes interferem diretamente na evolução da paisagem cárstica.

Devido ao clima semiárido e à escassez de fontes de água superficial, a água subterrânea supre essencialmente as demandas da agricultura irrigada na região de Lapão e, secundariamente, as demandas para consumo humano e dessedentação de animais. Alguns estudos, como Ramos *et al* (2007) sugerem uma superexploração do sistema aquífero cárstico na região com aprofundamento do nível de água, o que aumenta os riscos de ocorrência de fenômenos de subsidência e abatimentos cársticos.

Eventuais restrições ao uso da água subterrânea na região de Lapão, visando a minimizar a ação dos fenômenos cársticos, implica naturalmente restrições às atividades econômicas do município, pois não existem de imediato outras fontes de suprimento para a agricultura irrigada.

Alguns ambientes naturais hoje ocupados pela população humana, como a região de Lapão, têm um equilíbrio frágil do ponto de vista humano, sendo muito arriscado negligenciar os limites naturais ao crescimento e ao desenvolvimento populacional.

O êxito na ocupação humana em áreas que oferecem riscos naturais (como vulcões, tsunamis, terremotos, escorregamentos, inundações ou mesmo fenômenos cársticos) provém do conhecimento profundo dos processos físicos, químicos e/ou biológicos que se relacionam a esses riscos e as formas de interferência antrópica que aumentam ou diminuem as condições potenciais de ocorrência de acidentes ou que agravam as consequências decorrentes desses acidentes.

De forma semelhante, a ocupação humana em áreas que apresentam alguns recursos naturais escassos só deve ocorrer quando é planejada e seu crescimento pautado em ações estratégicas tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista do equilíbrio ambiental.

Assim, na região de Lapão o estudo dos fenômenos de subsidência e abatimentos cársticos suscita uma discussão geológico-geotécnica que, por sua vez, estabelece o tema hidrogeologia como ponto essencial da investigação.

Para subsidiar a discussão dos temas geologia, geotecnia e hidrogeologia, foi realizada uma revisão bibliográfica dos processos de subsidência e colapso em terrenos cársticos e do risco geológico associado, trazendo os conceitos estabelecidos por White (1998), Waltham *et al* (2005) e Ford e Williams (2007).

Em seguida, apresenta-se a caracterização do meio físico em uma escala regional (arcabouço geológico e estrutural e contexto climático). Para tal, foram consultados trabalhos desenvolvidos nos últimos trinta anos, publicados em forma de teses, artigos, boletins técnicos e trabalhos acadêmicos, dentre os quais foram destacados para descrição geológica-estrutural: Lagoeiro (1990), Danderfer Filho (1990), Souza *et al* (1993), Cruz e Alkmim (2006), Kuchenbecker *et al* (2011) e Reis *et al* (2013). Para caracterização do contexto hidroclimatológico destacam-se os livros e documentos elaborados por: Souza *et al* (2005), Silva (2005), ANA (2006), Suguio (2010); Nossa (2011) e Hasui *et al* (2012).

Uma vez caracterizado o contexto regional, foram selecionados trabalhos para o detalhamento geológico-estrutural em escala local. É apresentada uma síntese das informações obtidas no mapeamento geológico na escala 1:50.000 da Bacia do Riacho do Juá, apresentado no item 4 deste relatório e informações obtidas no mapeamento geológico em escala 1:50.000 realizado por Fragoso *et al* (2008).

O passo seguinte consistiu em reunir os relatos e as descrições das possíveis causas descritas na literatura dos fenômenos cársticos na região de Lapão, em especial os trabalhos de Ramos *et al* (2007), Santos *et al* (2009), Maia *et al* (2010) e Oliveira Filho & Bispo (2015).

As hipóteses levantadas nos estudos citados foram analisadas dentro do modelo conceitual do sistema aquífero da Formação Salitre, construído com base na pesquisa bibliográfica realizada ao longo do documento.

As discussões passam em seguida para aspectos do cenário atual da região de Lapão e a associação das características do arcabouço geológico-hidrogeológico com as formas de ocupação e intervenção na dinâmica hídrica em pontos específicos do sistema.

A estrutura e ordenamento do trabalho vai ao encontro da metodologia de investigação de análise de risco para o carste, apresentada por Waltham *et al* (2005) modificada de Benson *et al* (2003).

## **11.2 Processos de subsidência e colapso em terrenos cársticos**

Carste é o termo usado para descrever um tipo especial de paisagem que se desenvolve sobre um substrato de rochas solúveis (como calcários, mármore e evaporitos), rico em cavidades e um extenso sistema de circulação de água subterrânea. O carste pode ser entendido como um sistema aberto que funciona por meio da interação de processos hidrológicos e geoquímicos em superfície e também em subsuperfície (Ford & Willians, 2007).

O carste clássico refere-se a áreas de ocorrência de calcários, caracterizadas pela presença de surgências, sumidouros, paredões, vales cegos, depressões fechadas e lagos associados à dolinamentos ou a extensas superfícies rebaixadas, os poljés. Os diversos condutos subterrâneos e as cavidades desenvolvidas nos maciços rochosos estão em grande parte conectados à superfície, o que permite a existência de fluxos hídricos de velocidade elevada entrando e saindo do substrato rochoso. Além das formas cársticas geradas pela dissolução da rocha, existem também feições construtivas, formadas pela precipitação de carbonato, como os tufas calcárias depositadas por águas saturadas em carbonato de cálcio e os espeleotemas.

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

### **11.2.1 Desenvolvimento do carste e os processos de dolinamentos**

Para o desenvolvimento das feições cársticas condições específicas sobre a porosidade primária e as discontinuidades preexistentes são necessárias. Normalmente, os calcários mais porosos tendem a desenvolver um grande número de canalículos que proporcionam um fluxo difuso pouco favorável para o desenvolvimento de grandes vazios, não resultando em cavernas ou mesmo em um grande número de dolinas em superfície. Porém, em casos onde a rocha tem porosidade primária diminuída, a dissolução concentra-se nas discontinuidades discretas, aumentando a velocidade do alargamento das fissuras e condutos propiciando condições para o desenvolvimento de cavernas e do relevo cárstico (Waltham *et al*, 2005).

A dissolução dos calcários ocorre lentamente por meio do alargamento das estreitas fissuras pré-existentes, pelo contato com a água em fluxo laminar. O alargamento da estrutura ganha velocidade quando se inicia o fluxo turbulento. No início do processo, pode levar alguns milhares de anos para que uma fissura tenha alguns milímetros de abertura. Entretanto, quando a fissura cresce para uma caverna larga e o fluxo aumenta, as paredes da caverna podem retroceder em uma velocidade de 0,1 mm/ano (White, 1988; Waltham *et al*, 2005).

Ao longo do tempo, as cavernas podem ser inundadas crescendo até que a estrutura não seja mais estável e ocorra o abatimento do teto. As cavernas e condutos podem ainda evoluir para um estado seco devido a um soerguimento ou diminuição do aporte hídrico, e assim serem destruídos apenas pela erosão durante a exposição do maciço em superfície.

A dissolução da rocha carbonática depende da presença de CO<sub>2</sub> na água. O CO<sub>2</sub> é proveniente do contato das águas da chuva com a atmosfera e os ácidos orgânicos presentes nos solos. A água acidificada é capaz de reagir com a rocha, principalmente com o mineral carbonato de cálcio (calcita), liberando íons bicarbonato. Esse fato endossa a importância da existência de solos e matéria orgânica para os processos de carstificação, e indica que os pontos de máxima dissolução ocorrem nos locais onde águas agressivas encontram diretamente a rocha. Existindo um perfil de solo, a dissolução ocorrerá principalmente no contato solo-rocha. O contato entre o solo e a rocha calcária (zona do epicarste) é, em geral, mais abrupto do que gradual, bastante irregular, e pode conter pináculos de rocha saliente que atravessam o solo.

Segundo Williams (1985), a saturação do solo acima da rocha frequentemente ocorre devido à baixa capacidade de absorção, permitindo o fluxo lateral de água ao longo do contato, promovendo a dissolução acelerada no epicarste. As taxas de dissolução na zona de contato rocha-solo são normalmente altas (0,1 cm/ano) segundo White (1988). Karmann (1994) estimou a taxa de rebaixamento da superfície epicárstica do carste do vale do Ribeira de Iguape em torno de 31,1 ± 6 mm/1000 anos (Auler *et al*, 2003). Já a região cárstica de Lagoa Santa, avaliada por Pessoa (2005), indica uma taxa de denudação cárstica de 22,5 ± 4 mm/1000 anos.

O carste em rochas calcárias é mais desenvolvido em clima úmido temperado e nas regiões tropicais, devido à disponibilidade de dióxido de carbono no solo e também a maior aporte pluviométrico (Waltham *et al*, 2005). As taxas de denudação cárstica a longo prazo, conforme White (1984), crescem linearmente com a precipitação pluvial e dependem da disponibilidade de CO<sub>2</sub> e da temperatura, variam de 8 a 130 mm/1000 anos.

Apesar de existir algumas áreas hoje cujo substrato calcário encontra-se em clima desértico e, teoricamente, pouco propício ao desenvolvimento do relevo cárstico, é muito importante considerar a evolução climática da área durante as variações ocorridas no tempo geológico, que podem ter originado feições cársticas atualmente inativas ou mesmo soterradas.

O contexto tectônico influencia na dinâmica do sistema cárstico, pois pode impor condições de maior energia sobre a movimentação da água. Durante a implantação, o sistema cárstico registra as características tectônicas dos

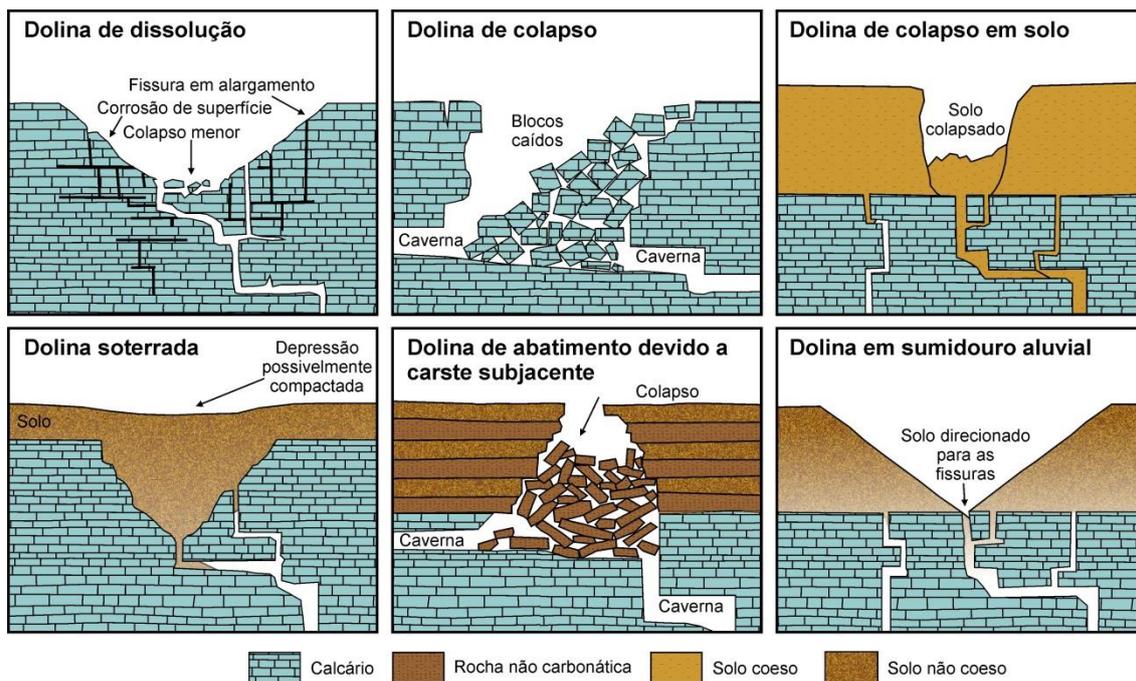
maciços, tais como o estado de fraturamento e a posição dos níveis de base, assim como suas variações. Após a implantação, a evolução do carste passa gradualmente a registrar as mínimas movimentações tectônicas que afetam os maciços. Um evento de soerguimento corresponderia a um rebaixamento dos níveis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

As modificações na estrutura interna dos maciços calcários pelo processo de carstificação são acompanhadas por alterações também em superfície. Uma das estruturas do exocarste que denota a modificação do arranjo interno dos maciços são as depressões fechadas. Dentre as depressões fechadas estão as dolinas e uvalas.

As dolinas são depressões naturais, em formato de prato, cônicas ou cilíndricas, muito comuns na paisagem cárstica. Normalmente são subcirculares em planta, e podem alcançar dezenas a centenas de metros de diâmetro, embora, em geral, tenha extensão variando de alguns metros a aproximadamente 1 km. Dolinas podem se formar em qualquer zona climática, mas as grandes depressões ocorrem com maior frequência em clima tropical úmido. A profundidade normalmente é menor que dezenas de metros.

É comum no carste a ocorrência de depressões fechadas desenvolvidas por meio da coalescência de duas ou mais dolinas. Essa feição é chamada uvala e tende à forma elipsoidal, com orientação associada à direção do fraturamento da rocha onde se concentram os fluxos de água subterrânea.

As dolinas se desenvolvem por um conjunto de processos inter-relacionados, incluindo dissolução da rocha, colapso, fluxo de solo e água, e colapso de solo. Um ou mais desses processos pode originar uma dolina. A classificação básica das dolinas tem seis tipos principais, conforme apresentado por Waltham *et al* (2005) e ilustrado na Figura 11.2.



**Figura 11.2: Principais tipos de dolinas: dolinas de dissolução, dolinas de colapso (dolina de colapso em solo, dolina de abatimento devido à carste subjacente) e dolinas de subsidência lenta (dolina em sumidouro aluvial).**

**Fonte: modificado de Waltham *et al* (2005).**

É importante ressaltar que existe um grande grupo de dolinas que se classificam em tipos intermediários entre os seis grupos citados, devido a uma combinação dos processos típicos utilizados para a definição das classes. Por exemplo, muitas dolinas são formadas por uma sucessão de escorregamentos e colapsos, misturando os processos típicos das dolinas em sumidouro aluvial (“*suffosion doline*”) e das dolinas de colapso. Outro grupo importante são as dolinas que se desenvolvem pela combinação de dissolução e colapso em pequena escala, que são típicos do processo de erosão dentro do carste.

As dolinas de dissolução ocorrem em rochas aflorantes ou subaflorantes (sob camadas pouco espessas de solo). Normalmente apresentam tamanhos que variam entre 1 m a 1.000 m, em formato de bacia, indicando que mais material foi removido do seu centro do que de suas bordas. Essa remoção de material ocorre pelo ataque químico do topo da rocha, sendo o fluxo de água conduzido até fissuras normalmente ligadas a condutos e cavidades em subsuperfície (Figura 11.2).

Forma-se, então, um sistema de recarga pontual, centrípeta e convergente. As principais variáveis que determinam o volume de material que será removido são o volume de água drenada através da dolina e a concentração do soluto nessas águas. As dolinas de dissolução desenvolvem-se lentamente, e são encontradas em superfícies de rochas solúveis expostas a alguns milhares de anos.

Dolinas de colapso são as depressões formadas principalmente por processos mecânicos que evoluem de baixo para cima a partir de uma cavidade de

dissolução prévia. O termo colapso refere-se ao movimento rápido de queda de blocos do maciço no interior dos vazios do carste.

O colapso pode ocorrer em camadas carbonáticas (dolinas de colapso “*sensu strictu*”), em camadas não carbonáticas que recobrem os calcários (dolina de abatimento devido à carste subjacente – “*caprock doline*”) ou ainda em camadas de sedimentos inconsolidados (dolina de colapso em solo – “*dropout doline*”) sobre o carste. Em todos os casos o colapso é precedido pela dissolução da rocha carbonática formando os vazios no maciço nos quais o material é depositado.

No caso das dolinas de colapso em calcário, ou as “*caprocks dolines*”, ocorre o fraturamento, quebra e por fim colapso de camadas de rocha que perderam a sustentação pelo alargamento dos vazios no interior do maciço ou modificações no nível de água dentro do maciço.

Quando as dolinas são formadas diretamente nas camadas calcárias é comum que o espaço vazio seja parte de um sistema de cavernas. O colapso pode ocorrer quando o teto da caverna para de crescer e o nível de água se aprofunda, ocorrendo a intensificação da dissolução e enfraquecimento do teto, seguido pelo colapso. Dolinas de colapso recém-desenvolvidas normalmente apresentam bordas íngremes e formato cilíndrico, mas com o tempo as laterais degradam e o fundo é preenchido com material coluvionar, assumindo na superfície uma morfologia suave de bacia. As dolinas de colapso são geralmente menores em diâmetro do que dolinas de dissolução, embora existam algumas exceções.

De forma semelhante, as “*caprock dolines*” formam-se quando o teto da cavidade dentro do estrato carbonático cresce para cima atingindo a camada insolúvel. Fragmentos começam a desprender do teto formando uma pilha de sedimentos no piso da cavidade e zonas de fraqueza aparecem nas rochas sobrejacentes, que podem evoluir para o colapso pontual da camada.

Quando depósitos inconsolidados como aluviões ou colúvios recobrem camadas carbonáticas carstificadas, os sedimentos podem se mover gradualmente através dos condutos alargados por dissolução nas camadas subjacentes, resultando em uma subsidência no terreno.

O principal processo pelo qual os sedimentos se movem em direção aos vazios do carste é conhecido como “*suffosion*” (desenvolvendo uma “*suffosion doline*”, ou dolina em sumidouro aluvial) e envolve um gradual escorregamento e lavagem de finos por uma combinação de processos físicos e químicos. Os sedimentos escorregam nos condutos podem ser depositados em pilhas em forma de cones no interior das cavidades, podem ser dispersos ao longo de uma rede de canais e canalículos ou mesmo serem transportados para fora do aquífero em uma ressurgência.

No caso de materiais não coesos, a fração argilosa do material tende a mover-se como uma lama nas cavidades encobertas depositando nas passagens camadas ou cones de lama, enquanto a fração mais grossa tende a permanecer próxima à superfície. Nesse caso, a dolina formada, em geral, apresentará apenas alguns metros de diâmetro e profundidade. Em solos não

coesos o processo de subsidência de uma dolina pode ocorrer durante meses ou anos.

Entretanto, quando a camada de solo é constituída por sedimentos coesos, a perda de material pode ocorrer de baixo para cima por certo tempo sem nenhuma expressão em superfície, até que os espaços vazios aumentem e haja o colapso repentino da camada (“*dropout doline*”).

O termo dolina de subsidência normalmente é utilizado para definir qualquer dolina em material inconsolidado, agrupando as “*dropout dolines*” e as “*suffosion dolines*”.

As dolinas e uvalas podem progredir para poliés (ou poljés), que são grandes planícies de corrosão que podem alcançar centenas de quilômetros. Podem apresentar drenagem superficial com sistemas de sumidouros e surgências. Podem ser secos, intermitentes ou inundados permanentemente.

As características do exocarste, especialmente das depressões, podem variar ao longo do tempo e ao longo da história geomorfológica dos terrenos cársticos. Em dolinas antigas, cujo processo de carstificação está interrompido e as estruturas de dissolução preenchidas por sedimentos, a água acumulada na depressão, ao invés de infiltrar, tende a ficar retida e ser consumida pela evaporação. Em um segundo momento, havendo a reativação do processo de carstificação com geração de espaços vazios em subsuperfície, novas dolinas podem se formar dentro das depressões fechadas pré-existentes.

Mudanças ambientais podem ainda fazer com que o espaço gerado em uma dolina seja preenchido por sedimentos, não deixando evidências na superfície da existência da feição cárstica pretérita (“*burried doline*” ou dolina soterrada).

As depressões cársticas de qualquer tipo, tamanho, forma ou morfologia que estejam parcialmente ou totalmente preenchidas podem ser denominadas dolinas soterradas. O subsolo de tais dolinas normalmente apresenta condutos preenchidos e zonas de brechas produzidas pelo entulhamento dos condutos e fissuras que deram origem a dolina.

No sistema cárstico, as dolinas têm papel importante para infiltração e recarga dos aquíferos. Entretanto, a dinâmica hídrica e a capacidade de infiltração e recarga das dolinas é bastante variável, dependendo das características geológicas dos maciços cársticos, das características geomorfológicas do entorno (que define parte do escoamento superficial), do tamanho da dolina (que define a capacidade de armazenamento das águas de chuva), dos mecanismos geradores da dolina, do tipo de cobertura do carste e da permeabilidade das estruturas/vazios que se encontram abaixo da superfície.

A maior parte das dolinas do mundo são heranças dos processos naturais do desenvolvimento do carste. Entretanto, o aparecimento de novas dolinas e as ocorrências de desastres com prejuízos à população tem mostrado que a influência humana é muito importante na deflagração dos processos de subsidência e abatimento cársticos.

No Alabama, nos Estados Unidos, um grande número de novas dolinas foi cadastrado a partir de 1950 (Waltham *et al*, 2005). Na maioria dos casos, os dolinamentos foram causados por atividades humanas, especialmente pela

exploração de água subterrânea, operações de minas e mudanças na drenagem superficial. Casos semelhantes são registrados na África do Sul e na China, onde a situação se agrava pelo desenvolvimento de assentamentos de alta-densidade sem saneamento de esgoto, sendo os dejetos dispostos diretamente no solo. Em cidades onde existe uma grande impermeabilização dos solos, com 50 a 80% de ocupação, também podem ocorrer áreas bastante sujeitas ao colapso, uma vez que a infiltração e percolação ocorrerão em áreas específicas (Waltham *et al*, 2005).

Sabe-se que dolinamentos podem ser induzidos por uma variedade de interferências provocadas por obras de engenharia. O sistema cárstico é sensível às mudanças no padrão de escoamento superficial e de infiltração que podem ocorrer em diferentes tipos de atividades. A alteração do fluxo pode ocorrer naturalmente em eventos de chuvas concentradas, porém em um curto período de tempo. Entretanto, mudanças mais persistentes são comuns como resultado de alteração no sistema de drenagem, construção de reservatórios, exploração de aquífero, desaguamento de minas, diminuição da camada de solo e retirada de vegetação, dentre outros.

A Tabela 11.1 destaca atividades que induzem o aparecimento de dolinamentos relacionados aos processos de: (i) aumento da chegada de água no perfil de solo; (ii) aumento de drenagem localizada devida ao declínio do nível de água; (iii) alterações físicas na superfície. Essas atividades foram listadas por Waltham *et al* (2005), a partir de uma compilação dos trabalhos de Newton (1987), Waltham (1989) e Cai (1991).

**Tabela 11.1 - Principais processos pelos quais os dolinamentos são induzidos por atividades de engenharia. Fonte: Waltham *et al* (2005).**

Principais processos pelos quais os dolinamentos podem ser induzidos em obras de engenharia
1. Aumento do aporte de água no solo:
<b>Escoamento de drenos sem planejamento;</b>
<b>Instalação de valas de drenagem desalinhadas;</b>
<b>Tubulação quebrada;</b>
<b>Poços não selados;</b>
<b>Irrigação para agricultura;</b>
<b>Contenção de água em reservatórios e bacias de retenção;</b>
2 Aumento do aporte de água por infiltração devido ao rebaixamento do nível d'água
<b>Superexploração do aquífero;</b>
<b>Teste de bombeamento;</b>
<b>Desaguamento para operação de pedreiras e minas;</b>
3. Alterações físicas nos solos e rochas:
<b>Remoção parcial de solo e conseqüente redução de sua espessura;</b>
<b>Remoção parcial ou total da vegetação;</b>
<b>Vibrações decorrentes de explosões ou de movimentação em plantas industriais;</b>
<b>Aumento da carga sobre fundações dentro do perfil do solo;</b>
<b>Variações do lençol freático.</b>

Apesar das dolinas constituírem riscos geológicos em muitas partes do mundo onde existe substrato carbonático, muitos dos riscos potenciais podem ser gerenciados ou controlados se o processo de formação das dolinas for devidamente avaliado.

É importante lembrar que os fenômenos cársticos podem ser considerados perigosos, entretanto só constituem um risco na medida em que tem probabilidade de ocorrer causando algum prejuízo de vida ou prejuízo material. Nesse sentido, o risco deve ser avaliado considerando a frequência de ocorrência e a magnitude do prejuízo associado, o que só é possível de ser estabelecido em uma análise específica de cada site de investigação.

### **11.2.2 Tipos de dolinas x principais perigos associados**

Segundo Waltham *et al* (2005), o colapso de rochas sobre cavidades formadas por dissolução em subsuperfície é um processo fundamental na evolução dos terrenos cársticos, entretanto representam riscos menos importantes para a engenharia civil. Os maiores riscos relacionados ao ambiente cárstico, tendo em vista as obras de engenharia civil, são associados a áreas onde ocorrem as dolinas desenvolvidas inteiramente nas coberturas de solo (“*drop-out*” e

“*suffosion dolines*”). Essas dolinas desenvolvem-se quando o solo é lavado para o interior dos vazios nos maciços carbonáticos.

Nas áreas onde existe um conjunto de cavernas bem evoluídas o restante do maciço não carstificado tende a ser bastante resistente, e apenas nas áreas dos vazios as rochas estão mais fracas representando zonas de risco. Além disso, podem ocorrer condições estruturais específicas nos maciços, formando peculiarmente locais propícios à formação de zonas carstificadas e de maior fragilidade. A posição, a forma, o tamanho das passagens das cavernas e suas câmaras e salões são em geral guiados pelas estruturas e feições estratigráficas da rocha.

Um conduto tubular em um calcário maciço muito abaixo da superfície é extremamente estável, entretanto, até a menor caverna pode colapsar se estiver em uma zona onde a rocha está extremamente fraturada ou sobre um teto muito fino de rocha estratificada. As cavidades em calcários estratificados são mais susceptíveis ao colapso do teto do que as cavidades em calcários maciços, conforme Waltham *et al* (2005).

Em locais onde as rochas carstificadas estão cobertas por solos não só as áreas dos vazios representam locais instáveis, mas também todo um volume de solo que se encontra sobre e ao redor das zonas de vazios, aumentando as áreas de risco e a probabilidade de se atingir uma das zonas instáveis. O maior número de ocorrências e cavidades e dolinas grandes associadas a uma cobertura insolúvel pode ser explicada pelo maior potencial de aporte de águas agressivas no sistema proveniente de bacias de contribuição alogênica.

O conhecimento dos tipos de dolina ajuda a entender os riscos mais severos associados a cada caso, levando em consideração os processos de gênese das dolinas. Entretanto, é importante lembrar que muitas vezes há a sobreposição de processos formando dolinas mistas cujos riscos precisam ser avaliados de forma ainda mais cuidadosa. Adiante, apresenta-se um resumo dos perigos associados aos distintos tipos de dolinas, conforme a concepção de Waltham *et al* (2005).

#### **11.2.2.1 Dolinas de dissolução**

Os lentos processos de dissolução que naturalmente controlam o desenvolvimento das dolinas de dissolução não produzem novas dolinas durante o período de vida de uma construção de engenharia. Entretanto, em áreas onde essas dolinas já existem algumas estruturas no subsolo devem ser avaliadas com cautela.

O risco geológico associado às dolinas de dissolução se encontra na existência de um alto grau de fissuras, condutos ou mesmo cavidades no subsolo. Os projetos de construção devem evitar as áreas de dolinas para a edificação das estruturas e, além disso, observar atentamente como será a interferência no sistema de drenagem, evitando o direcionamento das águas para dentro das dolinas e não obstruindo a drenagem natural no interior das mesmas.

Em alguns locais onde houve a tentativa de utilizar as dolinas de dissolução como reservatórios de água, tampando os sumidouros existentes, foi observada a evolução de novos pontos de saída da água e um novo sistema

de drenagem por canalículos e fissuras desenvolveu-se para conduzir a água até os principais condutos subterrâneos (exemplo do caso de Puleirang, Java, Indonésia, descrito por Waltham *et al*, 2005).

A dissolução pode ser acelerada pela interferência antrópica nas condições de circulação da água, por mudanças na qualidade das águas que são drenadas sobre os calcários, ou ainda pelo aumento do gradiente hidráulico sobre as fissuras ocasionadas por barramentos, por exemplo. Nesses casos, trincas, subsidências ou mesmo colapsos repentinos do terreno podem ocorrer, devidos à instabilização da rocha sob a dolina ou em seu entorno.

#### **11.2.2.2 Dolinas de colapso em rocha carbonática e em rochas não carbonáticas – “*caprock dolines*”**

Apesar das dolinas de colapso estarem presentes na maior parte das paisagens cársticas, elas são consideradas raras. As dolinas de colapso ou “*caprock dolines*” raramente ocorrem em densidade maior que uma em um quilômetro quadrado em paisagens cársticas que se desenvolveram talvez em um milhão de anos (Waltham *et al*, 2005). Nesse cenário, a chance de uma nova dolina se desenvolver dentro do local de uma determinada construção é muito pequena.

O principal risco geológico associado a esse tipo de dolina é a queda do teto de cavidades devido ao sobrepeso de estruturas posicionadas acima de cavidades desconhecidas localizadas próximas a superfície. As maiores dolinas de colapso são feições originadas em cavernas com passagens largas que são encontradas principalmente em regiões tropicais, em carstes bem evoluídos, de morfologia de cones ou torres.

#### **11.2.2.3 Dolina de colapso em solo – “*dropout doline*” e Dolina em sumidouro aluvial – “*suffosion doline*”**

A maior parte dos fenômenos de colapso na superfície de terrenos cársticos está relacionada ao transporte e queda de solos que estão sobrepostos a uma camada de rocha onde foi desenvolvida uma cavidade. As chances de ocorrência de subsidência e colapso cárstico trazerem riscos de prejuízo a uma construção por meio desse processo é muito superior às chances de ocorrência de um colapso de rocha. Tais dolinas são muito sensíveis às variações do aporte hídrico.

O tamanho da dolina de subsidência dependerá da espessura da camada de solo. É importante ressaltar, que devido à composição da maior parte dos solos englobar uma fração argilosa, que lhe dá uma consistência mais coesa, a formação de dolinas de colapso em solo é mais frequente que a formação de dolinas em sumidouro aluvial, pois que estas últimas se desenvolvem lentamente, sendo típicas de solos pouco coesos.

#### **11.2.2.4 Dolina soterrada – “*burried doline*”**

As dolinas soterradas constituem um risco geológico para a engenharia onde existem áreas instáveis em um terreno onde o topo rochoso é bastante desigual. Os condutos e fendas entulhados podem ser novamente lavados e estabelecer condições de subsidência.

Outro risco importante que pode estar associado a uma dolina soterrada é a determinação da profundidade para a construção da fundação, dependendo da distribuição dos furos de sonda a estimativa pode ser errônea. Até mesmo dolinas de poucos metros de extensão podem trazer impactos na construção das colunas bases, e ainda mais quando ocorrem grande dolinas soterradas em carstes já bastante evoluídos, com grandes variações na profundidade do topo da rocha em pequenas distâncias horizontais.

### **11.3 O modelo conceitual do sistema aquífero de Irecê-Lapão e a carstificação**

O sistema aquífero da região de Irecê-Lapão é formado nas rochas carbonáticas, localmente dolomitizadas e com raras ocorrências terrígenas, pertencentes à Formação Salitre, Grupo Una. Tais rochas representam parte da cobertura neoproterozoica da bacia de Irecê. Trata-se de um sistema anisotrópico, com condutividade hidráulica variável de acordo com a densidade de fraturas e feições cársticas, podendo ser considerado como um aquífero livre.

Estudos geofísicos realizados por Lins Marinho (1977) na região revelaram que a espessura do Grupo Una é muito variável, acompanhando as calhas dissecadas no grupo Chapada Diamantina, atingindo em alguns trechos, aproximadamente 2,5 km. A Bacia é mais espessa no setor oeste da área, com aproximadamente 5 a 7 km de profundidade. Em pesquisas efetuadas na área, Misi (1979) sugeriu uma espessura máxima da ordem de 530 m para a Formação Salitre, que ocorre em toda a área.

As rochas carbonáticas estão estruturadas em uma grande feição sinclinal de direção NNW-SSE (Sinclinal de Irecê), confinada entre unidades mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço, formando um cinturão epidérmico originado em um evento tectônico tardio durante o Ciclo Brasileiro. A bacia foi deformada por um vetor tectônico N-S, responsável pela nucleação de dobras e falhas E-W, com vergência para SSW (Lagoeiro, 1990; Reis *et al*, 2013).

A evolução da deformação nessa bacia confinada deu origem a setores estruturalmente diferenciados. Nas bordas da bacia, a deformação é acomodada através de falhas direcionais responsáveis pela rotação geral das estruturas. Para o sul, o cinturão perde gradativamente sua expressividade, ocorrendo apenas nas estruturas geradas previamente durante o desenvolvimento do Sistema de Dobras e Empurrões da Chapada Diamantina.

O estudo mais detalhado da deformação dos calcários na região de Irecê-Lapão, realizado por Fragoso *et al* (2008), mostrou a presença um sistema de mesodobras normais em chevron, acilíndricas, sem vergência definida, apertadas e com eixos sub-horizontais orientados segundo a direção E-W. Tais estruturas associam-se, localmente, a uma foliação plano-axial pouco desenvolvida, bem como a falhas de empurrão vergentes para sul. O segundo padrão de dobramento observado ocorre como um sistema menos expressivo, cujos eixos das dobras apresentam caimentos altos a moderados para as direções NW a NE. Diversos pontos apresentam transição, em um perfil de

poucos metros, de rochas com pouca ou quase nenhuma deformação para rochas intensamente dobradas e falhadas.

Conforme observado anteriormente o desenvolvimento das feições cársticas observadas em superfície nos afloramentos dos calcários da Formação Salitre ocorre preferencialmente nas direções EW, condicionada pelas descontinuidades das estruturas principais do maciço (acamamento, foliação, plano axial de dobras, falhas) e na direção a ela perpendicular, NS, condicionada por fraturamento.

Os processos de dissolução foram registrados, principalmente, nas unidades Nova América e Jussara. Na região leste da área de interesse a ocorrência de sumidouros é mais expressiva, com destaque para os municípios de João Dourado e Lapão, cujas exposições dos ritmitos pertencentes à Unidade Nova América, tem sua maior ocorrência espacial. Para a porção oeste, onde há um predomínio da Unidade Jussara, as feições cársticas mais comuns são as correspondentes a dissolução ao longo do plano de acamamento e zonas de interseção com fraturas ou juntas. Outras feições tais como lapiás e cavernas também foram identificadas.

Para os calcissiltitos correspondentes à Unidade Irecê, as únicas feições de dissolução identificadas correspondem a bacias de dissolução. Localizados no centro do Município de Lapão, nas proximidades do Cemitério Municipal.

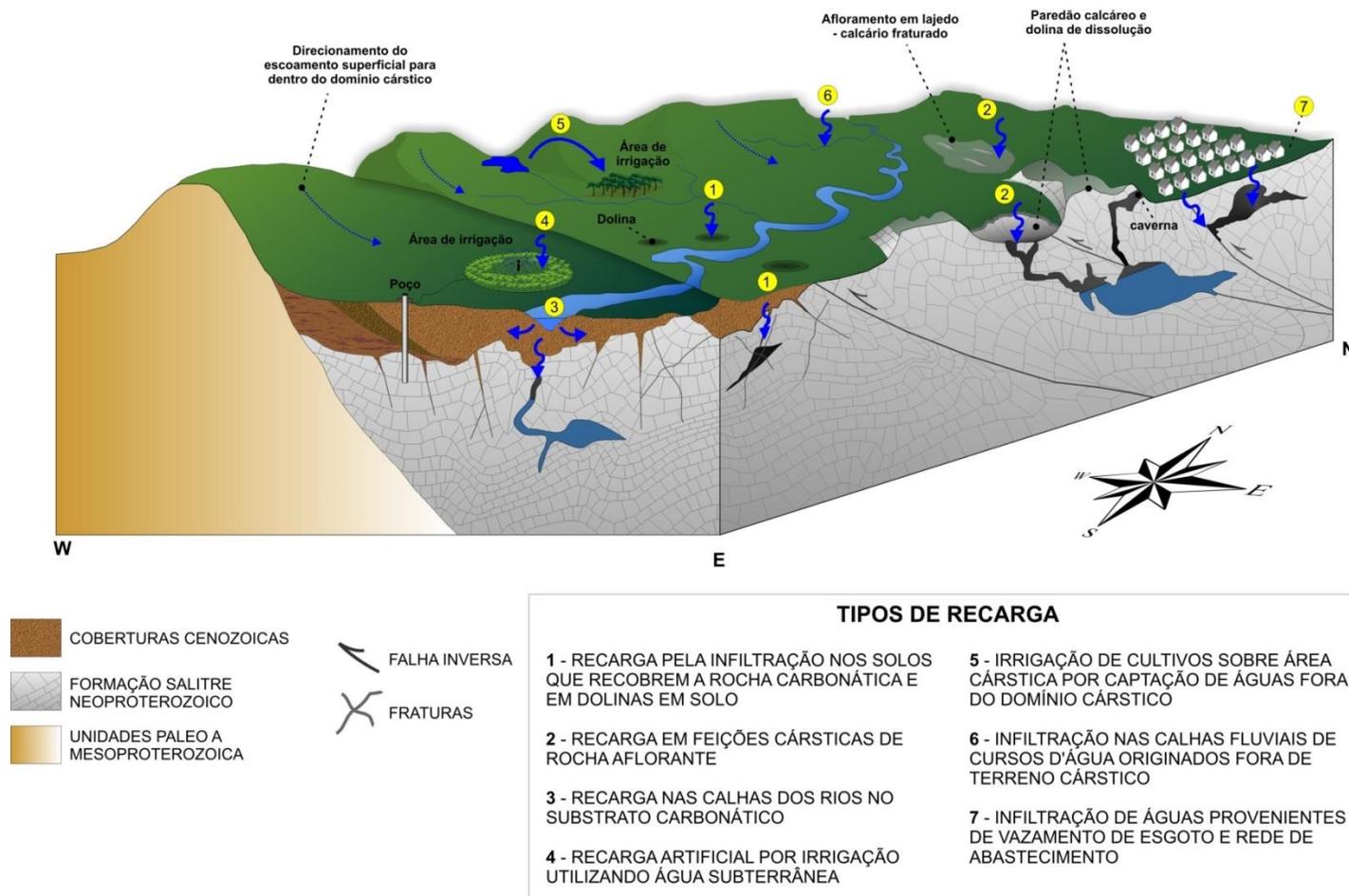
Assim, esse cenário configura um grande sistema hidrogeológico composto por dois subsistemas. O primeiro correspondente aos carbonatos da Formação Salitre (Sistema Aquífero Cárstico Salitre - SACS) e o segundo pelas rochas mesoproterozoicas siliciclásticas que compõem um sistema de aquíferos fissurais entremeados por aquitardes e aquicludes (Sistema Aquífero do Supergrupo Espinhaço SASE). O SASE, em geral, tem porosidade e permeabilidade associadas a fraturas e falhas, sendo a porosidade primária bastante reduzida pela diagênese e processos deformacionais posteriores.

O Sistema Aquífero do Supergrupo Espinhaço representa a base do Sistema Aquífero Cárstico Salitre, e o primeiro se projeta em superfície formando serras que marcam os grandes divisores hidrológicos, onde estão as cabeceiras das drenagens que compõem as bacias dos rios Verde, Jacaré e Paraguaçu. A calha principal dos rios Verde e Jacaré está posicionada diretamente nos calcários da Formação Salitre, dissecando essa unidade, e as camadas de solo que a recobrem, até a confluência com o Rio São Francisco a norte. Algumas drenagens que formam as cabeceiras do Rio Paraguaçu se desenvolvem sobre os calcários da Formação Salitre, e depois passam a correr sobre o substrato mesoproterozoico do SASE.

A conjugação dos componentes estratigráfico e tectônico favorece o desenvolvimento das estruturas cársticas do Sistema Aquífero Cárstico Salitre. Para a demonstração da importância desses controles na configuração cárstica do SACS serão avaliadas cada uma das etapas de recarga, circulação e descarga desse sistema aquífero.

A princípio, a recarga natural do sistema cárstico pode ser dividida em dois tipos (Figura 11.3): recarga autóctone, que ocorre em decorrência da precipitação sobre o sistema cárstico, e a recarga alóctone, que ocorre

proveniente do aporte de águas do escoamento superficial e fluvial de áreas não cársticas que compõem a bacia hidrológica dos rios Verde e Jacaré (áreas de afloramento do SASE).



**Figura 11.3: Processos de recarga no contexto do Aquífero Cárstico Salitre.**

A recarga alóctone tende a ocorrer nos trechos de rios e drenagens próximos ao contato geológico entre as unidades não cársticas do SASE e os calcários do SACS. As áreas mais propensas a esse tipo são aquelas posicionadas nas bordas leste e oeste da bacia de Irecê, em especial nas drenagens que correm de leste para oeste nas proximidades das cidades de Itaguaçu da Marra, Uibaí, Ibititá, Ibipeba e Barra do Mendes. No extremo sul na região entre e Mulungu do Morro-Iraquara-Palmeiras também é importante o aporte das águas captadas pelas serras que circundam a região, ao longo de trechos da drenagem superficial.

Além da importância do volume drenado nessas áreas externas ao sistema cárstico, cuja taxa de escoamento superficial tende a ser elevada pela altitude, maior índice pluviométrico e declividade dos terrenos, se destaca a influência da composição química das águas provenientes do SASE. Existe a tendência de que tais águas sejam levemente ácidas com poder de dissolução para desenvolver os vazios já existentes nas massas rochosas carbonáticas. Além disso, chama a atenção como zonas importantes para a captação das águas alóctones, a presença das falhas de borda da bacia, que apesar de serem estruturas bastante antigas podem representar descontinuidades profundas e que favorecem a dissolução e desenvolvimento de condutos e cavidades. A presença das estruturas na borda associada ao poder de dissolução e aporte das águas alóctones podem ter influenciado o entalhamento das drenagens principais que foram desenvolvidas capturando as drenagens para próximo das bordas da bacia carbonática (rios Verde e Jacaré).

Essa hipótese concorda com Ramos (2005), que propõem que o aumento da carstificação se dá no sentido sul e nas zonas de contato com os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina. Para o autor, as zonas mais carstificadas coincidem com as áreas de maior produtividade dos poços, com vazões máximas de 140 m<sup>3</sup>/h, enquanto que as vazões médias dos poços do aquífero variaram em torno de 10 m<sup>3</sup>/h.

Nesse sentido, é importante ressaltar a utilização das águas da barragem de Mirorós, localizada no Rio Verde, no limite dos municípios de Gentio do Ouro e Ibipeba. A barragem é destinada ao abastecimento de água de vários municípios da região, a exemplo de Irecê, Lapão, Ibititá, Ibipeba, Jussara, São Gabriel e outros. As águas desse reservatório também servem para a irrigação de mais de 3.000 ha de terra. Esse abastecimento de água pode ser entendido como uma recarga alóctone artificial.

Segundo Guerra (1986), devido à interação dos fatores climatológicos, litológicos e elementos estruturais (fraturas e falhas), o sistema aquífero apresenta diferentes estágios evolutivos. As porções norte e central exibem um estágio juvenil com presença de dolinas rasas e de pequeno porte, poucos sumidouros e a rocha apresenta um comportamento parecido com o de rochas fissuradas, onde as formas de absorção mais comuns são planos de estratificações, falhas e fraturas, constituindo um aquífero de natureza cárstico-fissural. Já indo em direção ao sul, e, sobretudo, próximo ao contato (bordas leste e oeste) com as litologias do Grupo Chapada Diamantina, o carste apresenta-se bem desenvolvido (dolinas de grande porte e profundas, sumidouros, vales cegos, estruturas de desabamento, etc.) devido à maior

disponibilidade de água proveniente das precipitações e da circulação subterrânea (fornecida pelos quartzitos do Grupo Chapada Diamantina), associada a fatores estruturais, principalmente, os fraturamentos e falhamentos.

Dentro do sistema de recarga autóctone podemos reconhecer três tipos (ver Figura 11.3):

- A água pode alcançar os reservatórios subterrâneos a partir da infiltração nos solos que recobrem as rochas carbonáticas;
- Podem infiltrar diretamente sobre a rocha, em áreas de afloramento, preferencialmente naquelas onde existem fraturas abertas e/ou feições cársticas, como dolinas de dissolução, sumidouros e fendas;
- A infiltração pode ocorrer em trechos onde os cursos de água superficiais ocorrem em regime influente, em posição superior ao nível freático.

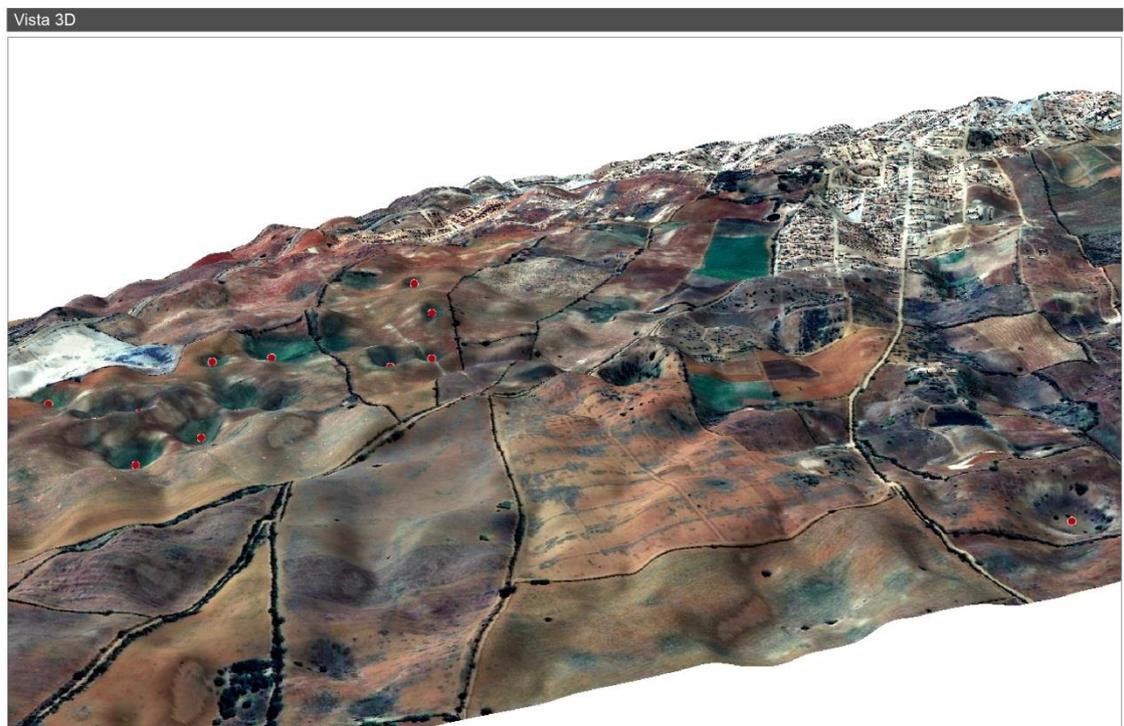
No mapeamento de solos realizado na bacia hidrogeológica de Irecê apresentado por Silva (2005), na área de ocorrência dos carbonatos da Formação Salitre ocorrem Cambissolos háplicos eutróficos, da região de Jussara para sul, e a norte Latossolos vermelho-amarelos e localmente Vertissolos. Em geral, os solos apresentam um matiz avermelhado, textura argilosa ou muito argilosa, rasos a moderadamente profundos e bem a moderadamente drenados.

Nossa (2011) estudou em mais detalhe a região de Irecê-Lapão. Nessa região a autora verificou que a camada de solo que recobre o aquífero, quando existente, é pouco espessa, variando em média de 1m a 3m em grande parte da área. O nível estático médio é raso com profundidades que variam de 7,70m a 18,50m nos poços selecionados.

A análise granulométrica dos solos coletados em 17 pontos de amostragem permitiu a caracterização textural dos solos na área como: silto-arenoso (41,18%), silto-argiloso (35,29%) e siltoso (23,53%).

Conforme mostram as imagens de satélite e estudos utilizando a modelagem digital de terreno (Figura 10.4), na zona de ocorrência dos carbonatos da Formação Salitre as depressões fechadas são muito marcantes, incluindo as áreas onde existem coberturas de solos. Devido à suavidade do relevo, essas depressões nas camadas de solo são pontos preferenciais de infiltração, quando ocorrem eventos de chuva capazes de produzir excedentes hídricos.

O relevo suave, favorável ao uso de máquinas, e o tipo de solo rico em nutrientes atrai para a região a implantação de culturas vegetais, tais como: feijão, cebola, milho, tomate, etc. (BAHIA/SRH, 1995, citado por Silva, 2005). A maior limitação diz respeito à falta de água, diante da precipitação reduzida e de distribuição irregular. Entretanto, com o uso da água captada dos aquíferos a partir da perfuração de poços tubulares, esta deficiência vem sendo corrigida (Silva, 2005) e as áreas agrícolas cresceram muito. Nesse caso, além das recargas naturais autóctones em solos, e em depressões fechadas nos solos, existe a recarga artificial autóctone, que ocorre localizada nas áreas agrícolas irrigadas.



**Figura 11.4: Visualização de dolinas no município de Lapão.**

Diferentemente das áreas não irrigadas e sujeitas apenas à recarga natural, o aporte de água nas áreas irrigadas tende a ser contínuo e muito superior às demais áreas. A consequência dessa recarga artificial é submeter localmente os solos e o epicarste logo abaixo a um fluxo hídrico diferente daquele que prevalece hoje e prevaleceu nos últimos milhares de anos. Tal fato favorece a existência local de uma taxa de dissolução e/ou fluxo de sedimentos diferenciada no subsolo. Dependendo da configuração das estruturas do epicarste e de sua evolução pretérita, fenômenos de subsidência seguidos ou não de colapsos podem ocorrer. Devido ao uso da água subterrânea, que naturalmente tende a ser bicarbonatada cálcica e de pH neutro a básico, o poder de dissolução das águas de irrigação é baixo. Entretanto, como foi visto no item 10.2 (Figura 11.2), dependendo das propriedades do solo a lavagem mecânica dos grãos pode acarretar o desenvolvimento das dolinas do tipo sumidouro aluvial “*suffosion dolines*”<sup>15</sup> ou do tipo colapso em solo “*dropout dolines*”.

Além da recarga artificial em si, a utilização da água subterrânea por meio de poços tubulares pode estar associada a outros fatores que favorecem o aparecimento de subsidências e colapsos. O rebaixamento localizado produzido pela exploração da água pode expor vazios cársticos à zona vadosa, o que pode desestabilizar a área no entorno do poço. Problemas construtivos dos poços localizados sobre o solo em terrenos carbonáticos podem também influenciar no desenvolvimento de dolinas tipo sumidouro aluvial e tipo colapso em solo. O revestimento da perfuração deve ultrapassar a espessura do solo inconsolidado e adentrar o calcário subjacente, para que o poço capte apenas as entradas d’água na rocha compacta, evitando assim o deslocamento do solo para dentro do mesmo.

O segundo tipo de recarga autóctone é a entrada direta da água da chuva no maciço carstificado. Os calcários da Formação Irecê apresentam muitas áreas de afloramento, e em muitas delas alguma feição cárstica se manifesta, como as dolinas de dissolução, dolinas de colapso e fraturas alargadas por dissolução. Nessas feições a entrada de água é rápida e o aporte é conduzido pelos condutos no interior do carste.

A terceira forma de recarga ocorre através da infiltração das águas diretamente na calha dos cursos d’água. Essa recarga ocorre nos locais onde o nível d’água está profundo e existem estruturas que permitem a infiltração das águas no leito e margens dos rios, especialmente após os eventos de chuvas. Em alguns casos pontos de sumidouro e surgências marcam zonas de trânsito entre as águas superficiais e subterrâneas por meio de condutos no carste subjacente. Muitas vezes as drenagens em superfície representam alinhamentos das feições cársticas, onde as águas podem transitar ora por caminhos na superfície ora em subsuperfície.

---

<sup>15</sup> Segundo Fannin *et al* (2015), o termo “*suffosion*” foi criado para descrever o mecanismo de formação de dolinas caracterizado por carreamento de material inconsolidado da cobertura para espaços vazios no calcário subjacente. O termo “*suffusion*”, preexistente, é utilizado comumente na medicina.

Conforme apresentado no item 11.2, a evolução dessas feições de dissolução cárstica é bastante lenta, ainda mais em um clima semiárido. Muitas das estruturas visíveis hoje são resquícios de um clima úmido pretérito, e talvez de processos de carstificação muito antigos iniciados ainda quando a rocha carbonática estava soterrada.

Assim como nas demais áreas onde se desenvolve o carste carbonático no Brasil, na região de Irecê-Lapão a evolução do relevo cárstico ocorreu durante um longo intervalo temporal.

O carste superficial começa a se manifestar quando as espessas camadas de rochas insolúveis sobrejacentes são removidas por erosão. O carste subterrâneo, entretanto, pode se desenvolver muito antes, sem que os estratos carbonáticos estejam diretamente expostos, já que as águas subterrâneas podem fluir até grandes profundidades e as rochas carbonáticas ainda soterradas podem estar emersas abaixo do nível de água subterrâneo.

Nesse estágio são muito importantes para o desenvolvimento cárstico que se inicia na formação dos canalículos no maciço, as estruturas e discontinuidades das rochas, muitas vezes herdadas de períodos tectônicos/deformacionais bastante antigos. É consenso entre os especialistas que, além da presença de rochas suscetíveis à solubilização de algum elemento químico abundante em sua composição, o desenvolvimento das paisagens cársticas está condicionado a características bioclimáticas e estruturais-tectônicas.

O sistema hidrogeológico da Formação Salitre, como salientado por Guerra (1986), está intimamente relacionado com características estruturais da rocha calcária. O comportamento estrutural condiciona fortemente o comportamento hidrogeológico na área, uma vez que as falhas e fissuras são de fundamental importância tanto nos processos de carstificação como nos processos de recarga, circulação e armazenamento da água. Normalmente, essas estruturas geológicas se refletem na morfologia da superfície do terreno através de feições típicas do carste, como o alinhamento de dolinas. Os pontos de cruzamento destes alinhamentos costumam ser zonas preferenciais de intensa carstificação.

De acordo com Bastos Leal e Negrão (2003), a carstificação na região de Irecê também se desenvolve em zonas de charneiras de dobras. Segundo os autores, nessas zonas, onde os processos de carstificação são mais intensos, ocorre a convergência do fluxo subterrâneo e a maior disponibilidade de água.

Nossa *et al* (2009) realizaram uma análise entre as principais direções de fraturamento e de fluxo em aquíferos cársticos dos municípios de Irecê e Lapão. Os métodos adotados no estudo de Nossa *et al* (2009) correspondem a fotointerpretação, monitoramento de 36 poços desativados para medição do nível estático, mapeamento dos sistemas de fraturas, dos contatos e dos planos de acamamento nas rochas, análise estatística das medidas estruturais, construção do mapa potenciométrico para determinação das direções de fluxo.

O estudo mostrou que a rede de drenagem principal coincide com as direções de fraturamentos mais significativos em toda a área, predominando a direção E-W. No setor sul, município de Lapão, observa-se em alguns locais a formação de feições cársticas bem desenvolvidas, como sumidouros e fraturas

abertas, onde as direções de fraturamento principais ocorrem NE-SW, entre N60° e N90°, com uma média na direção N84° e, secundariamente, entre N90° e N110°, muito próximas da direção E-W.

No setor norte, município de Irecê, a rede de drenagem principal também coincide com os principais sistemas de fraturas de direção E-W, muito próximos de 90°, predominando a direção NW/SE, entre N90° e N120°, com uma média na direção N100° e, secundariamente, entre N60° e N90°.

As fraturas abertas nas direções N-S entre 0° e 10°, E-W entre N70° e N100° e NW-SE entre N120° e N130° controlam as direções preferenciais das cavernas e demais estruturas de dissolução que ocorrem na área.

Nossa (2011) mostrou que as feições cársticas, como dolinas e sumidouros, equivalem a 4,7% da superfície da área de pesquisa, sendo mapeadas 177 feições cársticas no total, equivalendo a uma área de 11,73 km<sup>2</sup>. Com esta configuração cárstica, a recarga efetiva média calculada foi de 35,49 mm/ano, em função dos baixos índices pluviométricos da área, perfazendo 5,44% da precipitação total de 653 mm/ano, com uma reserva reguladora média de aproximadamente, 8,9 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano.

Bastos Leal & Silva (2004) observaram que as variações dos níveis freáticos na região de Irecê-Lapão apresentam uma significativa correlação com os processos de precipitação e que apenas precipitações acima de 50 mm promovem a subida nos níveis freáticos; além disso, em períodos de precipitações baixas ou nulas ocorre uma queda acentuada dos níveis freáticos dos poços na área.

As águas que circulam anualmente no sistema transitam nos condutos e cavernas em direções variadas, mas tendo como nível de base local os rios Verde e Jacaré, e como nível de base regional o Rio São Francisco.

Villanueva (2014) apresenta uma pesquisa desenvolvida no aquífero Salitre com o objetivo de caracterizar a hidroquímica e a constituição isotópica das águas, utilizando isótopos estáveis de hidrogênio, oxigênio e carbono inorgânico dissolvido ( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}CCID$ ) em amostras coletadas em poços. As análises isotópicas obtidas em poços tubulares localizados no setor leste apresentam um menor enriquecimento isotópico do que aquelas obtidas em poços localizados no setor norte-noroeste. Tal fato sugere que o enriquecimento isotópico ocorre, sobretudo, de Leste para Oeste, concordante com as direções preferenciais de fluxo obtidas na área.

Silva (2005), a partir de dados de nível de água de poços, construiu um mapa potenciométrico para a bacia hidrogeológica dos rios Verde e Jacaré. Observa-se o comportamento variado dos fluxos subterrâneos no carste dos distintos setores da bacia. A sul, na região de Iraquara o autor destaca a ocorrência de fluxos que convergem para o interior da bacia, no sentido da base do sinclinal, que nessa região ainda está bem preservado, sendo a calha de eixo NS preservada dos dobramentos de eixo leste-oeste e de vergência para sul que dominam na parte superior da bacia.

Nas demais áreas da bacia, há a tendência de direcionamento dos fluxos para as bordas, próximo das calhas dos principais rios. Nota-se, na região centro-norte a existência de um divisor hidrogeológico de direção NNE-SSW. Na

região centro-sul o divisor hidrogeológico identificado está posicionado na direção NW-SE, separando os setores nordeste e sudeste.

No estudo hidroquímico realizado por Nossa (2011), a autora verificou que, das amostras analisadas referentes às campanhas de 2009 e 2010, 51,62% são caracterizadas como águas Bicarbonatadas Cálcicas e Mistas e 48,38% apresentam características de águas Cloretadas Cálcicas e Mistas. Além disso, foram identificados valores mais elevados que os valores máximos permitidos pela legislação para os seguintes elementos: cálcio, magnésio, dureza total, sólidos totais dissolvidos, sulfato, fluoreto, nitrato, nitrito, cloreto e arsênio.

#### **11.4 Estudos anteriores do comportamento cárstico de Lapão**

O item 5.2.2, do presente relatório, tratou da eletrorresistividade de detalhe realizada em Lapão no âmbito do presente estudo do Carste São Francisco.

No presente item é apresentado um histórico dos abatimentos de terreno bem como uma análise dos estudos anteriores realizados. São cinco os trabalhos anteriores considerados mais importantes, abordando os fenômenos cársticos na região de Lapão e seu entorno. Esses trabalhos serão discutidos a seguir.

Ramos *et al* (2007) investigaram a condição de superexploração do Aquífero Salitre. O estudo constatou que nos últimos 20 anos houve um contínuo rebaixamento do nível hidroestático devido ao uso em excesso das águas subterrâneas. Para atender à demanda crescente, milhares de poços foram construídos, atingindo 6.000 unidades em 2004, acarretando uma taxa de rebaixamento de, aproximadamente, 1,0 m por ano. A exploração revelou-se mais intensa na porção central do aquífero entre os municípios de Irecê e Canarana, onde as atividades agrícolas estão mais concentradas. Foram monitoradas a variação dos níveis e a precipitação regional entre dezembro de 2002 e setembro de 2004. Os valores do nível freático obtidos foram comparados com dados do monitoramento realizado durante o período de fevereiro de 1980 até abril de 1982, apresentados em Guerra (1986). De forma geral, o aquífero apresenta níveis freáticos rasos, menores que 15 m, em mais de 50% dos poços. Níveis mais profundos (> 45 m) foram observados nas porções sul e sudeste (ex: região de Iraquara - Luz *et al*, 2004; Silva, 1973). Os poços monitorados foram perfurados em diferentes locais e apresentam profundidades entre 50 e 140 m, entradas de água entre 10 e 90m e capacidades específicas variando entre 0,15 e 4,71 m<sup>3</sup>/h/m, revelando a heterogeneidade do sistema aquífero.

O Instituto de Gestão das Águas e Climas responsável pela Gestão das Águas superficiais e subterrâneas no Estado da Bahia, usando de suas atribuições legais, chegou a propor restrições de uso da água subterrânea na Bacia do Riacho do Juá. Os estudos realizados por INGÁ (2009) identificaram uma forte relação das fissuras e subsidências com a circulação intensa da água provocada pelo bombeamento dos poços. O INGÁ cadastrou 588 poços em 15.000 ha, na bacia do riacho do Juá. Desses poços, 263 estavam, na época, desativados e 14 poços sem nenhum tipo de informação. A descarga total produzida nesta área era de 35.964 m<sup>3</sup>/dia (13,13 hm<sup>3</sup>/ano). O Plano de Recursos Hídricos do Estado da Bahia (PERH - 2004) avaliou uma reserva

renovável de apenas 9.859 m<sup>3</sup>/dia (3,60 hm<sup>3</sup>/ano), sugerindo a existência de superexploração.

Um terceiro estudo investigativo das causas dos fenômenos cársticos ocorridos em Lapão foi desenvolvido por Santos *et al* (2009). O estudo utilizou métodos geofísicos na zona urbana e periurbana de Lapão para verificar as estruturas cársticas do subsolo e quais seriam as áreas com maior risco de ocorrência de novos fenômenos cársticos.

Conforme a descrição de Santos *et al* (2009), após os abatimentos cársticos ocorridos em 2008 em Lapão, o executivo municipal acionou, concomitantemente, o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT/SP) e a Defesa Civil do Estado da Bahia com vistas a determinar a extensão e a dimensão do ocorrido, visando adotar medidas para prevenir e resguardar a população nas áreas de risco.

O Relatório Técnico do IPT/SP foi repassado à Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM) pela prefeitura de Lapão. Como resultado de observações preliminares no campo e análise do referido relatório, a CBPM entendeu ser necessária a execução de levantamentos geofísicos terrestres para compreensão dos abatimentos ocorridos. Após contato com o Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (IGEO-CPGG/UFBA) foi definida a realização de Levantamento Gravimétrico e de Eletrorresistividade. Os trabalhos contaram também com a parceria da Galvani Indústria Comércio e Serviços S.A.

Nesse contexto, Santos *et al* (2009) utilizaram para a análise dos riscos novos fenômenos cársticos:

- O mapeamento das rachaduras e trincas no terreno e em edificações na zona urbana de Lapão realizada pelo IPT-SP;
- Levantamento geodésico por estação total para produção de dados cartográficos pela CBPM;
- Levantamento gravimétrico para caracterizar as cavidades, executado pelo CPG/UFBA e CBPM;
- Levantamento de sondagem elétrica para discriminar a posição do nível d'água e as diferenças de resistividade elétrica entre o calcário e os vazios, para identificação de cavidades. O ensaio foi conduzido por CPG/UFBA e pela CBPM.

A compilação desses dados culminou na determinação de áreas de risco, utilizando como critério o posicionamento das anomalias gravimétricas associadas às características eletroresistivas do meio, o que permitiu identificar e estimar o tamanho e profundidade das cavidades. O estudo aponta cinco áreas de risco na cidade de Lapão e na área periurbana (Figura 11.7), sendo que duas tem maior relevância.

A primeira localiza-se a norte, na Fonte de Lapão (Área de risco 1 – Figura 11.5). Nesse local, no mapa Bourguer foram destacados três núcleos associados a cavidades:

- Núcleo ocidental – contraste de densidade de  $-1,80 \text{ g/cm}^3$ , topo a 4,0 m, base a 10m, dimensões: 35 m E-W por 40 m N-S;
- Núcleo central – contraste de densidade de  $-1,80 \text{ g/cm}^3$ , topo a 4m, base a 10m, dimensão: 55 m E-W por 15 m N-S;
- Núcleo oriental – contraste de densidade de  $-1,50 \text{ g/cm}^3$ , topo a 6m, base a 12m, dimensão: 30 m E-W por 15 m N-S;
- A área 1 mostra uma evolução do processo de carstificação na direção aproximada E-W, com extensão em torno de 300 m.



**Figura 11.5: Posicionamento das áreas de risco na área urbana e periurbana de Lapão: em vermelho, eletrorresistividade + gravimetria e em preto, gravimetria. Fonte: Santos *et al* (2009)**

Apesar de o desenvolvimento do processo de carstificação na parte central da cidade ser interpretado como de intensidade menor, é preciso tomar a devida precaução pela possibilidade das construções estarem sobre cavernas. Os autores acrescentam que na extremidade oeste da área perfilada existe um desenvolvimento cárstico intenso, necessitando de um detalhamento geofísico.

A área de risco 2 situa-se no extremo sul da zona urbana de Lapão, praticamente no limite noroeste do loteamento Ida Cardoso. Nessa área existe um grande risco de colapso, pois as dimensões das anomalias interpretadas na

gravimetria são bastante significativas. Foram identificados três núcleos, assim interpretados:

- Núcleo SW – contraste de densidade de  $-2,60 \text{ g/cm}^3$ , topo a 0,5 m, base a 25 m, dimensões: 40 m E-W por 40 m N-S na porção mais rasa e 170 m N-S na porção mais profunda;
- Núcleo central – contraste de densidade  $2,40 \text{ g/cm}^3$ , topo a 2 m, base a 12 m, dimensão: 40 m E-W por 50 m N-S;
- Núcleo NW – contraste de densidade de  $-1,00 \text{ g/cm}^3$ , topo a 3 m, base a 15 m, dimensão: 150 m E-W por 210 m N-S.

Na área 2, a região de risco está disposta segundo uma direção ENE-SSW, com o desenvolvimento de sua carstificação direcionada para SW, até a extremidade W da área perfilada. Há um risco elevado nas construções que ficam na parte noroeste do loteamento Ida Cardoso, bem como na plantação de cebolas dentro de uma dolina. Os autores recomendam que o tráfego de veículos pesados deva ser evitado nesta parte da cidade, e propõem ainda analisar a possibilidade de relocar moradores.

Na circunvizinhança da Fonte do Lapão, bem como na parte nordeste da Vila Ida Cardoso, percebe-se que as rachaduras na superfície do terreno têm relação com as trincas vistas nas edificações, indicando que essas devem ser decorrentes do mesmo processo cárstico.

Santos *et al* (2009), por fim, ressaltam a importância para o aperfeiçoamento da análise de risco e prevenção de colapsos cársticos a execução de estudos geológicos, geofísicos e de dinâmica hídrica subterrânea nas áreas de maior densidade populacional, focando inicialmente nas áreas de maior densidade populacional.

O trabalho de Maia *et al* (2010) teve como proposta investigar os aspectos geológicos e estruturais do substrato da região de Lapão a fim de entender os controles e as possíveis causas dos fenômenos geológicos associados ao aparecimento das rachaduras e trincas e das subsidências ocorridas nos anos de 2008 e 2009.

No início de outubro de 2008 foi relatado o aparecimento de rachaduras em ruas, trincas em casas e subsidência de terreno com rejeito centimétrico nas áreas urbanas e rurais no município de Lapão, Irecê. As subsidências e rachaduras ocorreram paulatinamente, de leste para oeste, acompanhado as margens do riacho do Juá com uma pequena inflexão na direção NW-SE seguindo na direção da Fonte do Lapão, localizada na cidade de Lapão (Maia *et al*, 2010).

Segundo a descrição de Maia *et al* (2010), o evento começou na Fazenda Sete Cascas em setembro de 2008, se propagou para a fazenda do Juá 15 dias depois e no dia 05/10/2008 afetou a área urbana no entorno da praça da Fonte de Lapão. Em 2009 duas novas subsidências ocorreram na localidade de Tanquinho, 6 km a oeste da cidade de Lapão. As fissuras e subsidências registradas foram de pequena proporção, e ocorreram de forma relativamente lenta.

Após uma pesquisa bibliográfica, os autores realizaram trabalhos de campo para medida de nível d'água em poços e medida das atitudes das estruturas rúpteis e das fissuras no solo (60 medidas) que foram tratadas posteriormente. Foram registrados os relatos dos moradores quanto à ocorrência espacial e sequência temporal dos eventos. Além disso, realizou-se um levantamento das datas de explosões para a extração mineral em minas de fosfato no entorno e das obras de implantação da rede de esgotos a fim de comparar as datas dos eventos com os registros dos casos de rachaduras e subsidência. Outras causas possíveis avaliadas no estudo foram as movimentações neotectônicas e superexploração de água subterrânea.

Os resultados das medidas estruturais, em diagrama de rosetas, mostraram como direções principais das estruturas rúpteis um sistema conjugado de fraturas NE-SW e NW-SE interpretadas como consequência da compressão regional orientada na direção N-S (Costa, 1989 apud Maia *et al*, 2010).

Com base em um sistema de tensões característico de um ambiente tectônico transcorrente, as fraturas abertas seriam aquelas posicionadas na direção NS, entre 0° e 10°, as fraturas de alívio seriam as fraturas de direção E-W, entre 70° a 100°. Esses dois conjuntos de fraturas abertas foram descritos como os principais controles das cavernas e das demais estruturas de dissolução na área de Lapão. As direções preferenciais de fraturas propostas como controle da carstificação foram confirmadas por alinhamento de anomalias no mapa gravimétrico. Segundo os autores, os alinhamentos observados e medidos em campo, na direção NW-SE, entre 120° e 130°, são coincidentes com a laminação das rochas, mostrando um controle importante de carstificação ao longo dos planos de acamamento. Essa direção preferencial de carstificação, bem como a direção NW-SE, foram flagradas no estudo geofísico por eletrorresistividade realizado no âmbito do presente estudo (ver item 5).

As medidas do nível de água em poços e a configuração das rochas mostram a existência de um aquífero cárstico livre, cujo nível de base é representado pelas calhas dos rios que cortam a região. O mapa das equipotenciais elaborado pelos autores mostra uma direção de fluxo importante para NEE, contrário a direção do fluxo do riacho do Juá, sentido E-W, controladas pelas fraturas de alívio. Essa inversão foi relacionada à dinâmica de exploração de água na área avaliada.

O estudo mostrou a ocorrência de um aprofundamento do nível d'água nos anos de 1969 a 2003, com um incremento de 0,32 m/ano e também um aumento na profundidade dos poços perfurados. Também foi identificada uma tendência de diminuição das chuvas ao longo do período estudado

A hipótese das fissuras e subsidências estarem relacionadas às detonações na área de mineração de fosfato foi descartada, devido à distância (aproximadamente 7 km) e falta de correlação entre as datas dos eventos e das detonações. No caso das detonações para construção de redes de esgoto também não há evidências que apontem nenhuma relação de causa, tendo em vista as datas dos eventos.

Apesar de existir uma grande geosutura que atravessa a área de estudo, posicionada na direção NW/SE, cuja reativação neotectônica poderia ser associada a sismos desencadeando subsidência e fissuras, tal hipótese

também foi descartada porque a direção geral da propagação dos eventos não coincide com a direção da geosutura.

O fato dos eventos cársticos terem ocorrido no final do período seco, onde o nível d'água se encontra mais profundo, dentro de uma tendência de declínio do nível d'água e aumento da profundidade dos poços, se mostra favorável à hipótese que associa a superexploração e rebaixamento do nível d'água aos eventos de subsidência e rachaduras. Entretanto, ainda não há uma evidência clara da relação dos fatos.

Na literatura há muitos trabalhos que indicam que o rebaixamento do nível d'água em áreas cársticas onde existe um perfil de solo é muito importante para induzir eventos de subsidência e colapso, pois a água nesse caso tem grande importância na sustentação geotécnica. Porém, diferente desse cenário, as cavidades na região de Lapão estão posicionadas em sua maior parte nos maciços rochosos, sendo os solos pouco espessos acima do calcário.

A análise final de Maia *et al* (2010) aponta como causa do processo de subsidência e fissuras a carstificação induzida e acelerada da rocha pela entrada de águas acidificadas proveniente do lançamento de esgotos e águas servidas de atividades agrícolas sobre o aquífero, em áreas a montante do local onde ocorreram os eventos.

A mudança da qualidade da água de infiltração na região, devido ao fornecimento de água da adutora da barragem de Mirorós para abastecimento da cidade de Lapão, pode ser um fator agravante, permitindo um descarte de águas ricas em substâncias orgânicas ácidas com forte poder de dissolução.

Os autores acima citados propõem ainda que o colapso que originou a dolina na fazenda Juá pode ter barrado ou desviado as águas que antes seguiam na direção da Fonte de Lapão gerando uma diminuição do nível d'água nesse local. A evolução das fissuras que ocorreu de leste para oeste acompanhando as margens do riacho do Juá, ocorreu no sistema de fraturas interpretadas como fraturas de alívio nas direções 70° a 100°.

As direções das fraturas das rochas estudadas são concordantes com as das fissuras do solo, nas direções NW-SE e NNE-SSW, evidenciando notável controle estrutural dessas fendas, sobrepondo a essas direções a influência da direção e caimento dos planos de acamamento.

Em fevereiro de 2013, novos danos nas edificações por acomodações do substrato rochoso ocorreram na região central do núcleo urbano do município de Lapão. Após os novos danos, a Prefeitura de Lapão solicitou a CPRM para uma avaliação dos riscos geológicos. Na ocasião, geofísicos, hidrogeólogos e geotécnicos realizaram campanhas geofísicas, coletaram dados hidrológicos e realizaram a setorização das áreas consideradas como de risco muito alto.

Oliveira Filho (2015) deu continuidade ao estudo iniciado pela CPRM visando a uma avaliação geotécnica da área urbana de Lapão e do entorno da cidade, principalmente naquelas previstas no plano diretor municipal como áreas de expansão. O autor elaborou a Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão frente à ocorrência de afundamentos cársticos, em escala 1:10.000.

O zoneamento das áreas que poderiam estar sob influência de processos de subsidência ou vulneráveis foi baseado na utilização do método geofísico de eletrorresistividade somada a um sistemático levantamento de campo e fotointerpretação da área de estudo. A área de estudo escolhida pelo autor é um polígono que abrange as áreas contidas no Plano Diretor Participativo do Município de Lapão - BA para novos parcelamentos de solo, somando um total de 16 km<sup>2</sup>.

Oliveira Filho & Bispo (2015) levantaram um total de 36 seções dipolo-dipolo, totalizando 7445 metros investigados. Em algumas seções o caminhamento foi repetido com valores de espaçamentos dos eletrodos variáveis com a finalidade de comparação dos resultados. Os levantamentos foram realizados na área urbana e no entorno da cidade ainda em fase de avanço da urbanização.

As feições de afundamentos presentes na cidade foram cartografadas previamente por meio de fotointerpretação e análise da carta topográfica. Durante a etapa de campo, todas as feições de afundamentos foram georreferenciadas com uso de GPS. Esse trabalho, além de validar a cartografia prévia dos afundamentos, permitiu delimitar as feições, que muitas vezes apresentam trincas em suas bordas, resultantes da ruptura por tração provocada pelos afundamentos.

Foi realizado ainda pelos autores o reconhecimento geológico na área de trabalho para ajustes da escala do mapa geológico base elaborado por Sampaio *et al* (2001), durante o Projeto da Folha Jacobina, escala (1:250.000). Para o levantamento das características geotécnicas foram identificadas estruturas no substrato rochoso que podem provocar instabilidades na superfície, além de fornecer informações sobre características que podem ou não favorecer a ocupação. Para realização dos ajustes geológicos e levantamento das características geotécnicas foram levantados dados em 42 pontos na área de estudo.

Nos perfis de eletrorresistividade foi comum a identificação de algumas feições que, tendo em vista o contexto geológico, podem ser diretamente associadas a estruturas cársticas:

- Arqueamento dos horizontes resistivos que podem ser interpretados como zonas de colapso. Isso ocorre porque as rochas com cavidades, além de deformadas e colapsadas, facilitaram a penetração de água e conseqüentemente o desenvolvimento acelerado do processo de alteração por intemperismo dos calcários, favorecendo a penetração da corrente elétrica;
- Zonas de deformação verticalizadas associadas também a feições alongadas de baixa resistividade;
- Setores com resistividades médias interpretadas como calcários bem preservados;
- Setores com forma circular de alta resistividade interpretados como cavidades.

O autor em pauta identificou uma unidade colúvio/residual sobre rochas carbonáticas da Formação Salitre. Esta formação em si, entretanto, admite quatro unidades geotécnicas denominadas pelo mesmo nome das unidades litológicas: Irecê, Nova América Superior, Jussara e Nova América Inferior.

As unidades Irecê e Nova América Inferior, que se restringem às porções NW e SSE da área de estudo, são constituídas por material metasedimentar predominantemente argiloso (calcissiltitos, calcilutitos, margas); enquanto que as unidades Jussara e Nova América Superior, que ocupam quase 70% da área de estudo, são constituídas por metasedimentos mais arenosos (calcarenitos e dolarenitos). Além das diferentes características faciológicas outros atributos como relevo, solo e posicionamento das unidades na Bacia do Riacho do Juá também influenciaram na caracterização das unidades geotécnicas.

Nas unidades Irecê e Nova América Inferior, o relevo se apresenta mais ondulado com áreas elevadas, e os solos possuem espessuras maiores. As ocorrências de feições cársticas nestas unidades são significativamente menores, se comparada às outras unidades. Este fato pode ser explicado pelo posicionamento mais distal destas unidades na Bacia do Riacho do Juá.

Nas unidades Jussara e Nova América Superior, o relevo é predominantemente plano, e os solos possuem espessuras mínimas, muitas vezes exibindo grandes lajedos rochosos. Nestas unidades há grande concentração de feições cársticas e cavidades subterrâneas. O fato de estas unidades estarem "encaixadas" na Bacia do Riacho do Juá, onde há maior quantidade de descontinuidades e maior circulação de água, somado a característica arenosa de suas composições, favorece o desenvolvimento do carste nestas regiões.

Uma característica importante observada nas unidades Irecê e Nova América Inferior é o preenchimento das estruturas rúpteis por material predominantemente argiloso. Nas descontinuidades abertas de direção E-W e N-S, que são as responsáveis por condicionar as maiores feições de afundamentos na região, ocorrem bolsões de material argiloso muito próximo à superfície. A proximidade com a superfície favorece a lixiviação deste material das descontinuidades pela água da chuva, formando vazios/cavidades internas.

A formação dessas cavidades próximas à superfície pode deixar a camada de rocha sobrejacente suscetível ao colapso, quando esta é submetida a um carregamento vertical provocado, por exemplo, pela expansão horizontal e vertical da área urbana da cidade.

Além das fragilidades intrínsecas do cenário geológico de Lapão, Oliveira Filho & Bispo (2015) ressaltam a importância da questão do rebaixamento e da recarga pela irrigação, afirmando que o somatório das interferências antrópicas no sistema cárstico contribui para acelerar os processos de afundamentos cársticos. A adição de água acidificada no sistema pode acelerar o processo de dissolução da rocha carbonática, alargando ainda mais os condutos e, dependendo das suas dimensões, levar ao arqueamento ou mesmo o colapso da camada de rocha sobrejacente, dando origem às feições cársticas. O rebaixamento do lençol freático por sua vez, retira um componente importante

de sustentação geotécnica do sistema, especialmente quando as águas antes atingiam a camada de solo.

Os terrenos cársticos, em geral, são naturalmente suscetíveis a afundamentos, contudo, quando partimos para uma escala de maior detalhe é possível delimitar áreas em que a possibilidade da ocorrência do processo de afundamento seja mínima, ou até mesmo inexistente.

Durante o estudo foi observado que as dolinas, circulares e ovaladas, são as feições cársticas mais comum na região, que também possui belas feições de lapíás. A setorização de risco realizada no entorno da área urbana mostrou que a ocupação de áreas como dolinas são perigosas (Oliveira, 2015). Diversas edificações que estão em áreas de dolinas têm apresentado problemas estruturais como trincas em paredes, vigas e pisos.

O surgimento desses problemas pode estar associado ao incremento de peso na superfície proveniente das obras de ampliação dos imóveis, evidenciando que áreas que já sofreram processos de afundamento são suscetíveis a acomodações do substrato rochoso, quando este é submetido a variações das cargas verticais.

Outro fator importante levado em consideração na análise da suscetibilidade é a ocorrência de vazios internos/cavidades no substrato rochoso, relativamente, próximos à superfície. Dados obtidos por meio de 7445 metros de investigações geofísicas indicam que estas cavidades podem chegar a ter dezenas de metros de diâmetro e profundidades inferiores a 15 m. Uma das características desses vazios, facilmente observada nos perfis geoeletricos, é a baixíssima condutividade elétrica, indicando que as cavidades estão secas.

Foram consideradas como áreas de alta suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, as áreas que já apresentavam superfícies instáveis (dolinas), e as áreas sobre vazios internos próximos à superfície identificados pela eletrorresistividade.

As áreas consideradas de média suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, são as áreas que coincidem com as unidades Jussara e Nova América Superior. As características geotécnicas destas unidades sugerem que elas são mais suscetíveis à ocorrência de afundamento do que as demais unidades.

Também foram consideradas de média suscetibilidade a afundamentos cársticos e acomodações do substrato rochoso, áreas que correspondem a um buffer de 20 m no entorno dos limites dos polígonos de alta suscetibilidade. Isto se deve ao fato de ter sido muito difícil durante os levantamentos geofísicos e de campo, estabelecer o limite exato da área de influência das estruturas observadas, uma vez que nem sempre ocorrem rupturas de tração (trincas) nas bordas dos afundamentos que possam ser mapeadas em superfície (Oliveira, 2015).

As áreas consideradas de baixa suscetibilidade não apresentaram indícios de instabilidade em superfície. Estas áreas são coincidentes as áreas de ocorrência das unidades Irecê e Nova América Inferior e suas características geotécnicas sugerem que elas são menos suscetíveis ao desenvolvimento de feições cársticas.

A integração dos dados de campo e dos mapas construídos foi sucedida pela definição das classes de aptidão à urbanização (Alta Aptidão à Urbanização, Média Aptidão à Urbanização, Baixa ou Inexistente Aptidão à Urbanização) que foram mostradas em mapa na carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização (Oliveira, 2015). Na carta estão descritas as características das áreas frente à ocorrência de afundamentos cársticos, frente às características geotécnicas e recomendações de uso.

Assim, conforme Oliveira Filho & Bispo (2015), as áreas definidas dentro das três classes de aptidão à urbanização ficaram assim caracterizadas:

- Áreas de alta aptidão à urbanização

Essas áreas se restringem às porções norte e sul da área estudada e representam cerca de 25% do total da área de estudos. Incluem zonas elevadas e zonas que não apresentaram indícios de instabilidade, como subsidências ou colapsos de terreno. Possuem relevo mais ondulado e solos com espessuras superiores a 1 metro. As áreas classificadas como de alta aptidão à ocupação não apresentam quaisquer restrições geotécnicas, ambientais ou geomorfológicas. Portanto, para sua ocupação por projetos de urbanização, são recomendadas análises prévias usuais em qualquer empreendimento de loteamento, como estudo geotécnico simplificado e sondagens, bem como procedimentos simples voltados à implantação do empreendimento, tais como a execução imediata de calçamento e drenagem pluvial, e a preservação da cobertura vegetal nos lotes enquanto não se iniciam as obras das edificações. Os locais onde já existe ocupação são áreas com pleno potencial para a consolidação urbana.

- Áreas de média aptidão à urbanização

Essas áreas se localizam sobre as unidades Jussara e Nova América Superior. Têm média suscetibilidade a afundamentos cársticos e representam cerca de 60% da área estudada. São compostas por grandes lajes de afloramentos rochosos, solos pedregulhosos e com espessuras inferiores a 1 metro.

Essas áreas têm como principais restrições a exposição de lajes rochosas e a pouca espessura de solos em outros pontos, aspectos que podem dificultar a sua ocupação, uma vez que a implantação do sistema de infraestrutura, como galerias de esgotos, drenagens pluviais, arruamentos, etc. requereria o desmonte da rocha com uso de explosivos.

Oliveira Filho & Bispo (2015) destacam que em ambientes cársticos o uso de explosivos no desmonte das rochas para a implantação dos sistemas de infraestrutura pode ser extremamente danoso, visto que a onda de choque provocada pelas detonações pode desencadear uma série de processos de acomodação do substrato ou mesmo provocar o colapso da faixa de rocha localizada entre os vazios internos (cavidades) e a superfície. Caso seja inevitável o uso de explosivos, devem-se desenvolver estudos geotécnicos mais detalhados e direcionados a estes locais, de forma a subsidiar medidas estruturais e não estruturais que garantam a estabilidade do terreno.

Esses procedimentos, segundo o autor acima, tornam mais onerosa qualquer intervenção de ocupação a ser feita nessas áreas, em comparação com as áreas de alta aptidão à urbanização.

- Áreas de baixa aptidão à urbanização

Essas áreas ocorrem em cerca de 15% da área de estudo. Constituem, em si, áreas de risco mapeadas em Oliveira Filho & Bispo (2015) e situam-se, por outro lado, nas áreas de risco mapeadas pelo Consórcio (Figura 10.15). Apresentam alta suscetibilidade a afundamentos e acomodações do substrato rochoso, tais como dolinamentos.

As dolinas, com formas circulares ou alongadas, estão associadas a estruturas como falhas e fraturas, que concentram maior fluxo de água e condicionam maior velocidade de dissolução das rochas carbonáticas.

As camadas de rocha sobre os vazios internos são as mais suscetíveis às subsidências e colapsos quando submetidas a cargas verticais. Apesar de a carstificação na região ser controlada pelas descontinuidades, durante levantamentos de campo e investigações geofísicas, pôde ser visto que os vazios internos (cavidades) também ocorrem de forma isolada, sem aparente relação com as zonas fraturadas.

A ocupação de áreas com dolinas mostrou, ao longo do processo de expansão urbana nos últimos 30 anos, a grande vulnerabilidade destes terrenos. Durante a interpretação da área em fotografias aéreas da década de 70, pode ser observado que nestas regiões não havia urbanização. Hoje, após a ocupação destas áreas, é possível observar os danos provocados pela constante acomodação do substrato rochoso em diversos imóveis da cidade (Oliveira, 2015).

Conforme alerta este autor, as áreas classificadas como de baixa aptidão à urbanização não devem ser ocupadas sem antes serem executados estudos geotécnicos detalhados, que indiquem medidas preventivas e corretivas antes de qualquer projeto de loteamento. No caso das dolinas e vazios internos devem-se realizar estudos geotécnicos detalhados para determinar se a ocupação será possível após a injeção de caudas de cimento, resinas ou outros produtos de estruturação.

Nessas áreas, já ocupadas, devem ser efetuados estudos detalhados das suscetibilidades e estudos de análise de riscos, uma vez que a análise inicial apontou restrições severas para a ocupação destas áreas. São locais de difícil, senão impossível, consolidação, pelos custos e incertezas das medidas corretivas e preventivas.

Por fim, as recomendações feitas por Oliveira Filho & Bispo (2015) para a continuidade dos estudos foram:

- A realização de estudos geotécnicos específicos na área, como por exemplo, determinar a resistência ao carregamento da faixa de rocha entre o teto das cavidades e a superfície;
- O estudo em áreas testes de injeção de caudas de cimento, resina expansiva e outros produtos de estruturação;
- A instalação de marcos topográficos de precisão na superfície em diversos pontos da cidade e o seu monitoramento constante por topógrafos e/ou engenheiros agrimensores.

A Tabela 11.2 resume as investigações realizadas pelos estudos acima analisados.

Tabela 11.2: Síntese dos estudos apresentados na literatura sobre os fenômenos cársticos no município de Lapão.

AUTOR	METODOLOGIA	FATORES ASSOCIADOS AOS FENOMENOS CÁRSTICOS	SUGESTÕES PARA REMEDIAÇÃO E PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS
Ramos <i>et al</i> (2007)	Estudo da variação do nível de água em poços (nível freático do aquífero cárstico) na microrregião de Irecê, estudo da precipitação e comparação com dados de anos anteriores.	Superexploração e rebaixamento do aquífero.	
INGÁ (2009)	Cadastros de poços e estudo de vazão de exploração	Superexploração do aquífero Irecê para atender as demandas de irrigação.	Restrições de uso da água subterrânea na Bacia do Riacho do Juá.
Maia <i>et al</i> (2010)	Investigação geológica e estrutural, pesquisa bibliográfica, medidas das estruturas rúpteis e das fissuras no solo, registro dos relatos de moradores, pesquisa de datas de explosões em minas no entorno e das datas de intervenção no sistema de esgoto, construção de um mapa potenciométrico para estudo das direções de fluxo e avaliação temporal de dados de poços.	Regime de superexploração e tendência de rebaixamento; Aumento das taxas de dissolução pelas entradas de águas acidificadas provenientes do lançamento de esgotos e águas servidas de atividades agrícolas a montante do local dos eventos; A mudança da fonte de água de abastecimento da cidade pode ser um agravante.	
Santos <i>et al</i> (2009)	Mapeamento das rachaduras e trincas no terreno, levantamento geodésico, investigação geofísica (gravimetria e eletrorresistividade) construção de mapas de risco.	Presença de grandes cavidades na rocha calcária no substrato da cidade de Lapão, com áreas onde o topo das cavidades está próximo a superfície.	Com base no mapa de risco foram sugeridas avaliações para relocação de moradores e restrição no tráfego de veículos pesados. Foi sugerido detalhamento da investigação geofísica em alguns setores estudados e ampliação da investigação em áreas de maior densidade populacional.
Oliveira Filho & Bispo (2015)	Confecção de uma Carta Geotécnica de Aptidão à Urbanização do Município de Lapão frente à ocorrência de afundamentos cársticos, em escala 1:10.000, por meio da utilização do método geofísico de eletrorresistividade somada a um sistemático levantamento de campo e fotointerpretação da área de estudo.	Identificação de feições geomorfológicas indicativas de vazios no subsolo e caracterização geofísica em profundidade. Esses atributos foram associados a formas de ocupação urbana.	Realização de estudos geotécnicos específicos na área, como por exemplo, determinar a resistência ao carregamento da faixa de rocha entre o teto das cavidades e a superfície; Estudo em áreas testes de injeção de caudas de cimento, resina expansiva e outros produtos de estruturação; Instalação de marcos topográficos de precisão na superfície em diversos pontos da cidade e o seu monitoramento constante por topógrafos e/ou engenheiros agrimensores.

## 11.5 O cenário atual da cidade de Lapão e os riscos do carste

Os itens anteriores descrevem como se dá o processo de formação das feições cársticas, especialmente dos dolinamentos, e mostram como o contexto natural da região de Lapão é favorável ao desenvolvimento dessas feições. O carste é um sistema dinâmico, onde existe um contínuo rearranjo do equilíbrio dos solos e maciços em função da movimentação intensa da água em superfície e subsuperfície. A superfície de uma área cárstica, seja ela composta por solos ou pelo topo da própria rocha carbonática, representa um horizonte de intensa transformação.

Conforme mostrado anteriormente, a cidade de Lapão está sobre uma área de calcários muito carstificados, existindo um grande número de condições naturais favoráveis ao surgimento de fendas, trincas, dolinas e colapsos.

Como a região de Lapão não está somente sob influência da dinâmica hídrica natural, pois existem núcleos urbanos, aproveitamento de água subterrânea por meio de exploração de poços com vazão elevada, áreas de irrigação, exploração de pedreiras, barragens em cursos de água - uma série de atividades modificadoras da dinâmica hídrica e das condições dos solos – é de se esperar o aparecimento de novas feições cársticas em domínios específicos. Essas intervenções tendem a intensificar os problemas de aparecimento de trincas e de subsidência em superfície acompanhadas por rachaduras em edificações, não sendo possível descartar os riscos de ocorrência de graves acidentes.

As causas apontadas na literatura, conforme mostram os trabalhos de Ramos *et al* (2007), INGÁ (2009), Santos *et al* (2009), Maia *et al* (2010) e Oliveira Filho & Bispo (2015), constroem cenários de risco em que diferentes aspectos se somam, tanto naturais quanto antrópicos. Considerando-se o substrato geológico, as condições hidrogeológicas e a urbanização do município de Lapão, foram ilustrados seis cenários de riscos associados aos fenômenos de subsidência e colapso cársticos (Cenários A a F – Figuras 11.6 a 11.12).

A apresentação desses cenários tem o intuito de facilitar a reflexão acerca da combinação de condições naturais do substrato cárstico existente na região de Lapão e as pressões provenientes da ocupação humana. As Figuras 11.6 a 11.12 servem para chamar atenção para situações possíveis para Lapão, mas que ainda assim, não exaurem todas as possibilidades de risco nessa localidade.

Para simplificação da discussão, a análise foi criada para uma única construção civil e/ou poço e seu entorno imediato. Vale lembrar, todavia, que tanto o sistema natural como a estrutura urbana têm componentes que interagem entre si, de modo que um determinado fator ocorrido em um local pode deflagrar outro em um local diferente. Exemplos que podem ser citados: o entupimento de um tubo de esgoto pode produzir o vazamento em outra tubulação, ou mesmo a obstrução de um conduto cárstico pode modificar o fluxo e gerar o abatimento de um setor de uma dada cavidade em outro local.

São mostradas seis condições naturais distintas do carste (quadro 1 das Figuras 11.6 a 11.12) representativas do substrato rochoso e do perfil de solo de várias áreas na região de interesse. Nos demais quadros das figuras acima

citadas estão ilustrados os distintos ambientes naturais com interferência antrópica, como: construção de casas e pequenos edifícios, instalação de redes de esgoto, e construção de poços e cacimbas.

Nesses cenários são mostradas situações onde existe uma instalação com problemas de vazamento na rede de esgoto e que faz uso de irrigação no jardim/ horta ou que não tem um sistema adequado de drenagem pluvial. Ilustra-se ainda a construção de edificações mais pesadas que podem significar uma sobrecarga no substrato que sustenta a edificação. De forma esquemática, descreve-se ainda uma situação onde uma edificação simples foi implementada, com adequada condição de saneamento e drenagem superficial. Entretanto, no terreno foi instalado um poço com problemas construtivos e vazão de exploração sem regulamentação.

### **11.5.1 Riscos para o cenário A**

Nos cenários A1 a A4 (Figura 11.6) o substrato é constituído por calcário aflorante, com uma depressão fechada do tipo dolina de dissolução cuja drenagem subterrânea está conectada a uma caverna posicionada em um intervalo de profundidade entre 5 a 15 metros. O calcário é estratificado e suas camadas são horizontais a sub-horizontais, levemente onduladas, sendo seccionado por um sistema de fraturas abertas e fraturas preenchidas por argila, que comunicam parcialmente com a cavidade. A cavidade tem água apenas em sua base. Em maior profundidade os condutos estão saturados e a água circula naturalmente da esquerda para a direita em direção a condutos mais profundos.

Em A2 sobre o calcário foi construída uma casa de um pavimento que foi atendida pelo sistema de coleta de esgoto e de abastecimento de água da cidade.

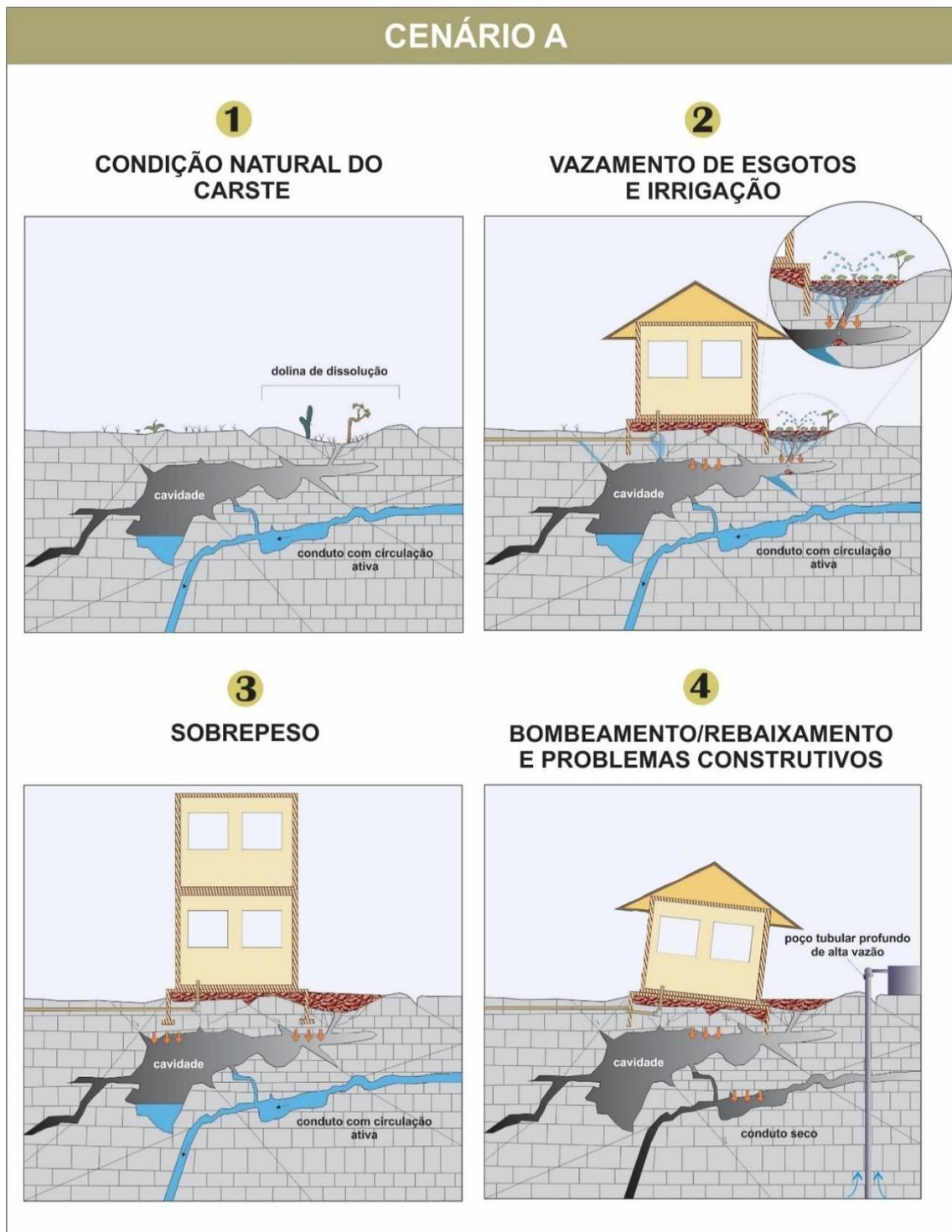
No local da dolina, os moradores nivelaram o terreno preenchendo com terra e plantaram uma horta, com rega diária. Após um tempo de construção a tubulação de esgoto começou a apresentar vazamentos, mas que ficaram despercebidos aos moradores e órgãos públicos.

O cenário descrito em A2 é favorável ao aparecimento de trincas na estrutura da casa, subsidência do terreno que pode ser seguido por colapso ou não. Nesse caso, os processos que estão modificando o equilíbrio do sistema é o aumento localizado da recarga, com águas acidificadas, tanto pelo vazamento da rede de esgoto quanto pela irrigação da horta cultivada dentro da dolina.

A água agora percola nas fraturas e canalículos da rocha com muito mais frequência e volume do que as condições naturais de precipitação permitiam. A percolação intensifica o processo de dissolução que aumenta a espessura das fraturas e do conduto principal da dolina que comunica com a cavidade. Água e sedimentos começam a cair dentro da cavidade fazendo com que na superfície, rachaduras apareçam no solo na área da horta.

No topo da caverna aumenta a umidade e o gotejamento e aquelas fraturas no teto, antes preenchidas por argila, foram parcialmente lavadas, permitindo o desmantelamento gradual do teto. Se esse processo der continuidade e a camada de rocha no topo da cavidade estiver intemperizada, o aumento do vão

da cavidade pode evoluir até que haja um completo abatimento do teto. A casa pode chegar ao ponto de ser engolida por uma dolina de colapso em rocha carbonática.



**Figura 11.6: Riscos associados ao carste exposto, onde existe um sistema de condutos conectados a cavidades muito próximas a superfície – Cenário A.**

Em um segundo cenário (ainda que não existam alterações na recarga no maciço) por estar a cavidade muito próxima a superfície, uma dolina de colapso em rocha carbonática poderá se desenvolver pelo sobrepeso, caso seja construída uma edificação mais pesada, conforme mostra o quadro A2. O teto da cavidade pode não ser resistente o suficiente para sustentar a edificação. Outro tipo de modificação no sistema natural de A1 é mostrado no quadro A4. Neste caso não há vazamentos ou sobrepeso. O problema, aqui, é um poço sem laje de proteção e que funciona com uma vazão não regulamentada, que foi suficiente para rebaixar o nível de água dos condutos e inverter o fluxo subterrâneo em uma grande região no entorno. A modificação na instabilidade do maciço pode ser decorrente do colapso de condutos em profundidade, que ficaram aerados tirando a sustentação da base da cavidade. Dependendo do novo arranjo de equilíbrio, a camada entre o teto da cavidade e a fundação da casa pode não ser estável, causando trincas nas paredes e rachaduras no piso e evoluir para o colapso.

Portanto, em uma situação geológica semelhante a essa descrita no quadro A1, após a estimativa das dimensões da cavidade, a ocupação urbana só é aconselhável após um detalhado conhecimento das condições estruturais e intempéricas da camada de rocha acima do vão da caverna, e da capacidade de sustentação dessa camada. Ainda assim, se a ocupação for possível, os fatores de aumento de risco apresentados nos quadros A2 a A4 devem ser eliminados.

Na cidade de Lapão, muitas áreas podem apresentar riscos semelhantes aos descritos nos cenários A2 a A4 (Figura 11.6), especialmente áreas urbanizadas com presença de dolinas de dissolução em rocha exposta ou sob cobertura pouco espessa de solo. Um caso preocupante, já destacado no trabalho de Oliveira Filho & Bispo (2015) é o do conjunto de casas populares do Bairro Ida Cardoso, construído sobre uma área de dolinamento. Nesse local já ocorreram subsidências com danos a imóveis, indicando a movimentação do substrato. A presença da dolina marca condições de carstificação no maciço em subsuperfície, atribuindo riscos de evolução do quadro de instabilização. Além dos fatores de risco descritos para os cenários A2 a A4 (Figura 11.6), um agravante nesse local, segundo registros apresentados no trabalho de Oliveira Filho & Bispo (2015), é a presença de lixo na camada de solo abaixo das casas, pois a área funcionava, antes da construção do conjunto habitacional, como local de despejo de resíduos da cidade de Lapão. O solo extremamente heterogêneo pode estar sujeito a recalque, podendo ainda conter áreas de permeabilidade aumentada onde podem ser concentrados fluxos de percolação. Ainda é importante salientar a provável formação de chorume com potencial de acidificar a água de percolação e aumentar a velocidade de dissolução na base da dolina. Outro local que pode estar sujeito a fatores de riscos semelhantes aos acima citados é a área do ginásio de esportes. Análises de campo identificaram também sinais de instabilidade evidenciados por trincas na superfície e pequenos afundamentos.

### **11.5.2 Riscos para o cenário B**

Nos cenários B1 a B4 (Figura 11.7) o substrato é constituído por calcário aflorante, em uma superfície irregular, com matacões de rocha, e presença de

um sumidouro com água no fundo. O calcário é estratificado e suas camadas estão inclinadas a sub-verticais, fortemente dobradas, sendo seccionadas por um sistema de fraturas abertas plano-axiais e falhas inversas. Em profundidade, existe uma rede de condutos largos que estão parcialmente conectados e saturados, e a água circula naturalmente.

No cenário B2, após o nivelamento da superfície e instalação da estrutura de saneamento, foi construída uma casa. Na parte aterrada o morador fez um jardim. Com o passar do tempo a casa apresentou rachaduras nas paredes e subsidência do piso e os canos de esgoto começaram a vazar. De forma semelhante à situação em A2, em B2 o carste também foi submetido a mudanças decorrentes da alteração nas condições de recarga.

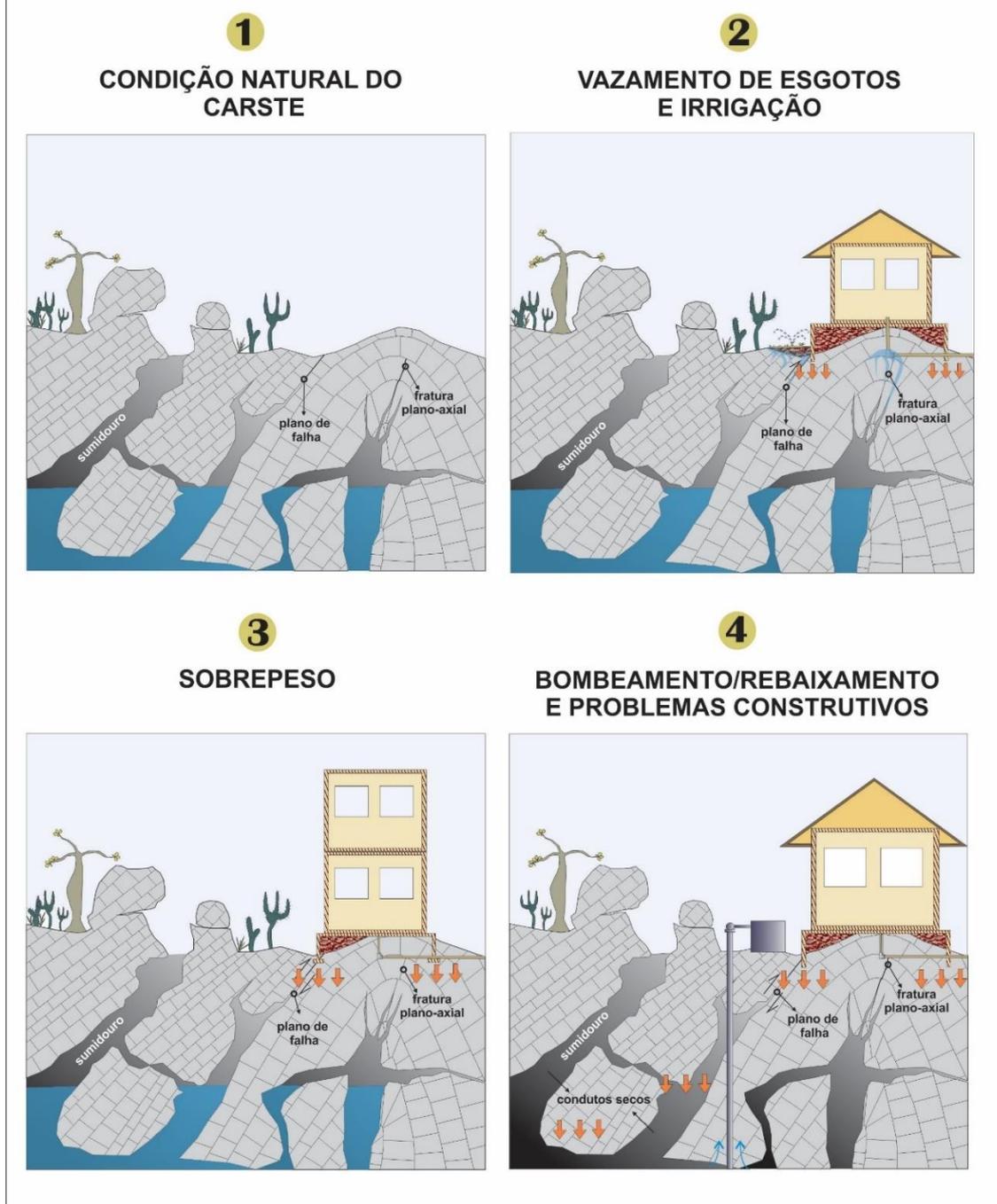
A irrigação do jardim e os vazamentos nas tubulações aumentaram a percolação de água nas fraturas e falhas, fragilizando ainda mais o maciço que já se encontrava parcialmente fragmentado e desconfinado. O agravante nessa situação foi que uma das fundações da casa estava sobre um plano de falha, que com o aumento da percolação e dissolução nessa descontinuidade, se movimentou causando as rachaduras no piso e parede da casa. Esse cenário também pode evoluir para um colapso, se o plano de falha perder a aderência e se movimentar rapidamente, causando sérios danos à estrutura da casa.

Os planos de falha e fraturas podem proporcionar a subsidência ou colapso de partes do maciço rochoso em uma situação de sobrepeso, conforme mostra B3. Em B3 não há recarga artificial, mas após o aterramento do local, foi construído um prédio de quatro andares. As fundações foram fincadas na rocha, porém, em uma área onde ocorrem falhas e fraturas. Sem conhecer a fragilidade do maciço, a edificação foi instalada utilizando as técnicas comuns para a construção de pequenos edifícios. Com o passar do tempo, o prédio apresentou rachaduras, e por causa dos danos aos pilares principais, os moradores precisaram ser realocados. Em casos onde o maciço está muito fragilizado, com fraturas e falhas sub-verticais, o excesso de peso pode causar movimentos de acomodação, desestabilizando as construções em superfície. Dependendo da forma como a acomodação ocorre, o prédio poderia ter colapsado após o aparecimento de trincas discretas.

Em B4, não há vazamentos ou sobrepeso. Uma edificação simples foi construída ao lado de um poço de ótima vazão, que teve sua vazão e tempo de bombeamento aumentados para suprir as demandas das novas casas construídas no entorno. Em cinco anos após a alteração do regime de bombeamento do poço o nível de água foi rebaixado em 5 m. O sumidouro que antes apresentava água no fundo ficou seco, e a água que ocupava o sistema de condutos abaixo da casa foi quase toda drenada, e o poço diminuiu drasticamente seu potencial.

Como não existem vazamentos ou sobrepeso, e a água que antes preenchia os condutos nesse caso específico não tinha função de sustentação do maciço, a mudança das condições hidrogeológicas nesse quadro podem não trazer problemas geotécnicos. Entretanto, se no entorno estivessem casas em condições semelhantes aos quadros A4, D4 ou E4 (mesmo sem seus respectivos poços) o risco de ocorrência de fenômenos cársticos na área dessas construções iria aumentar.

## CENÁRIO B



**Figura 11.7: Riscos associados ao carste exposto, onde as camadas estão inclinadas e dobradas, existindo falhas e fraturas onde houve o desenvolvimento de um sistema de condutos e cavernas conectados a superfície – Cenário B.**

Em Lapão, entretanto, já foi identificada uma região de risco muito alto em que a descrição geológica e geotécnica se assemelha ao cenário B, com fatores riscos possíveis semelhantes àqueles descritos em B2 a B4. O carste na praça da fonte de Lapão e no entorno apresenta um controle estrutural importante,

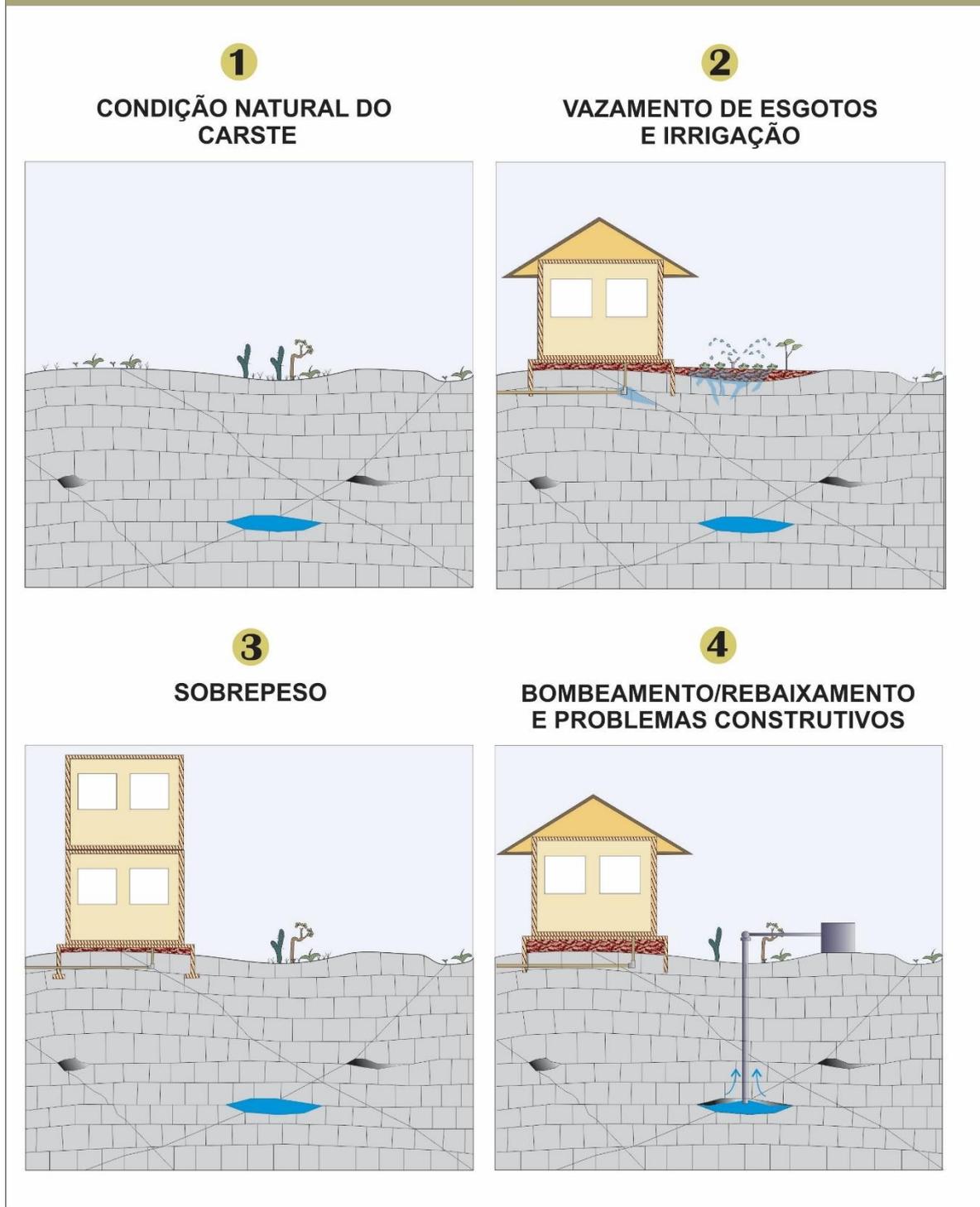
indicando uma continuidade na direção leste-oeste, aproximadamente. Conforme aponta o trabalho de Oliveira Filho & Bispo (2015) a região da Gruta do Lapão apresenta feições cársticas bem evoluídas em superfície e em subsuperfície, sendo ainda a área mais densamente ocupada da cidade, abrigando comércios e residências. Nessa região as trincas e rachaduras já indicam a condição frágil do carste em subsuperfície, condições tais já demonstradas também em estudos geofísicos. Nesse caso, todos os fatores agravantes citados nos quadros B2 a B4 devem ser avaliados e suprimidos com urgência. É também aconselhável a realocação de moradores e o monitoramento da movimentação do substrato e evolução das rachaduras e trincas.

### **11.5.3 Riscos para o cenário C**

Em C1 a C4 (Figura 11.8) o substrato é constituído por calcário aflorante, sem dolinas ou sumidouros, em superfície relativamente plana. O calcário é estratificado e suas camadas são horizontais a sub-horizontais, levemente onduladas, sendo seccionado por um sistema de fraturas fechadas. Em maior profundidade há o desenvolvimento de condutos onde os planos de fraturas se cruzam com o plano de acamamento da rocha. O nível de água está próximo aos 20 metros.

Novamente foram ilustradas condições onde ocorrem recargas artificiais (C2), sobrepeso (C3) e instalação de um poço com rebaixamento do nível de água (C4). Porém, nesse caso, o risco de desenvolvimento dos fenômenos cársticos é muito baixo a inexistente. A rocha está bastante coesa, com poucas estruturas favoráveis a percolação de água. Para que a dissolução produza feições cársticas, ainda sobre efeito da recarga artificial, o processo seria muito lento e poderia durar milhares de anos. Além disso, não existem vazios de dimensões suficientes para potencializar qualquer movimentação significativa do terreno.

## CENÁRIO C



**Figura 11.8: Riscos associados ao calcário exposto pouco carstificado – Cenário C.**

#### 11.5.4 Riscos para o cenário D

Em D1 a D4 (Figura 11.9) o cenário do carste é muito semelhante aos quadros A1 a A4, entretanto com duas importantes diferenças: existe uma camada de solo por cima do topo rochoso e o nível de água está bem próximo da superfície. O solo tem espessura aproximada de 5 metros e na superfície existe uma depressão fechada do tipo dolina de subsidência, cuja drenagem subterrânea está conectada a um sumidouro e uma caverna posicionada em um intervalo de profundidade entre 5 a 15 metros.

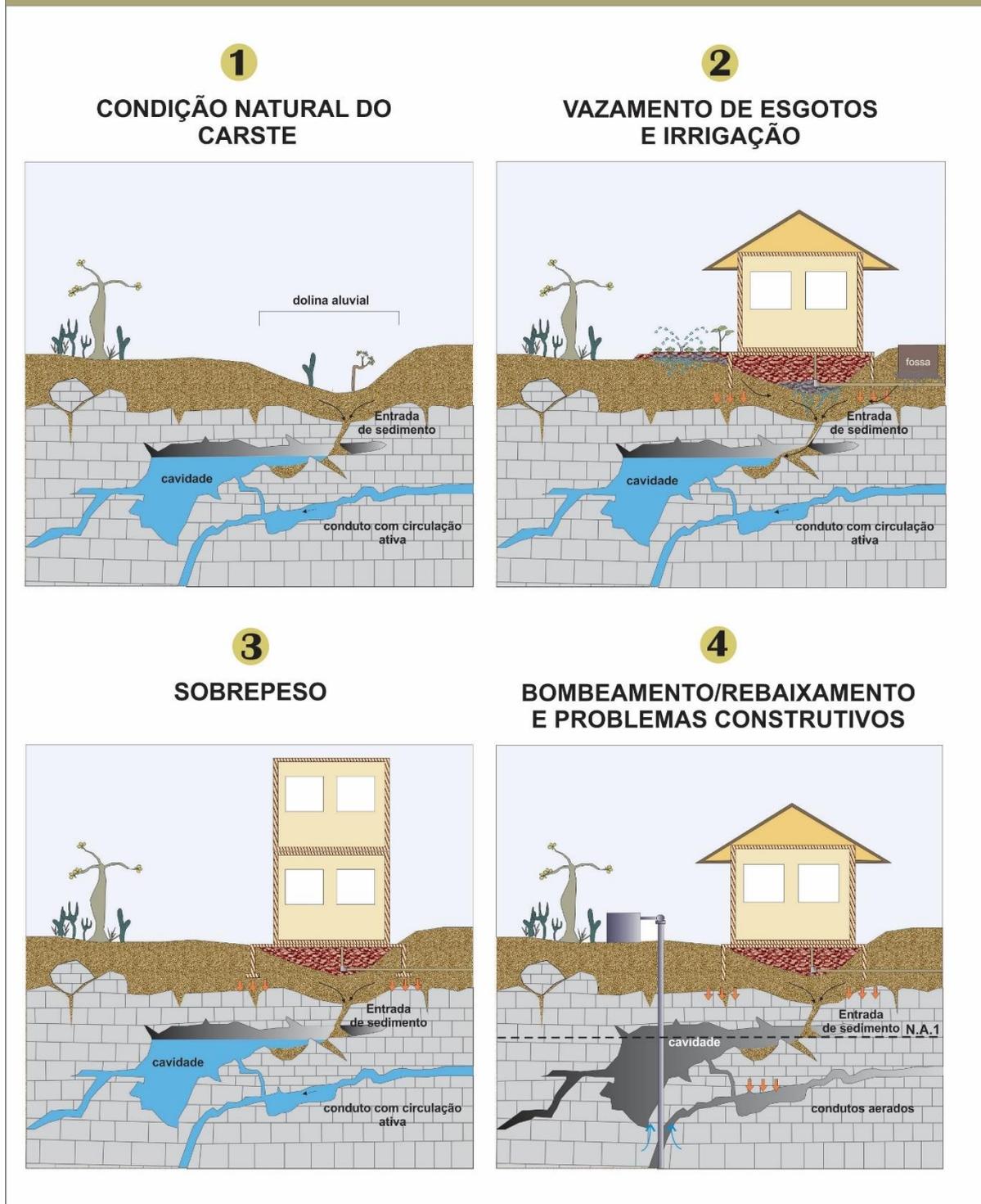
O calcário é estratificado e suas camadas são horizontais a sub-horizontais, levemente onduladas, sendo seccionadas por um sistema de fraturas abertas e fraturas preenchidas por argila, que comunicam parcialmente com a cavidade. A cavidade está saturada de água, assim como os condutos em profundidade.

Em D2 a dolina foi parcialmente aterrada, e sobre ela foi construída uma casa. Como o lote estava fora da área atendida pela rede de esgoto e saneamento da cidade, a família construiu uma fossa. A fossa foi construída inteiramente no solo, com 4 metros de profundidade, ficando no mínimo 1 metro acima do nível de água. Entretanto, a fossa não foi construída corretamente. Em pouco tempo o revestimento rachou, permitindo a drenança do esgoto até as fraturas da rocha, contaminando o lençol freático.

Com o passar do tempo, a água acidificada, percolando as fraturas na rocha, dissolveu parte das paredes das discontinuidades e criou outro ponto de conexão das águas da superfície com a cavidade. O aporte de água no contato solo rocha e em direção a cavidade desestabilizou o solo abaixo da casa. No entorno da casa, foram aparecendo rachaduras no solo e subsidência no assoalho. Por fim, após alguns anos, a camada de rocha já bastante frágil, acima da cavidade e abaixo da fossa, desabou, dando origem a uma dolina de colapso em solo, que destruiu a casa.

O quadro D3 mostra uma possibilidade onde existe risco de colapso de uma cavidade, com formação de uma dolina de colapso em solo pelo sobrepeso. As condições de formação são as mesmas daquelas descritas no quadro A3: a camada de rocha superior da cavidade pode simplesmente não ser resistente o suficiente para sustentar o peso da edificação. Ainda pode ocorrer um recalque do solo na base da edificação, fazendo com o que a estrutura apresente trincas e esse processo se desenvolva até que haja um colapso repentino.

## CENÁRIO D



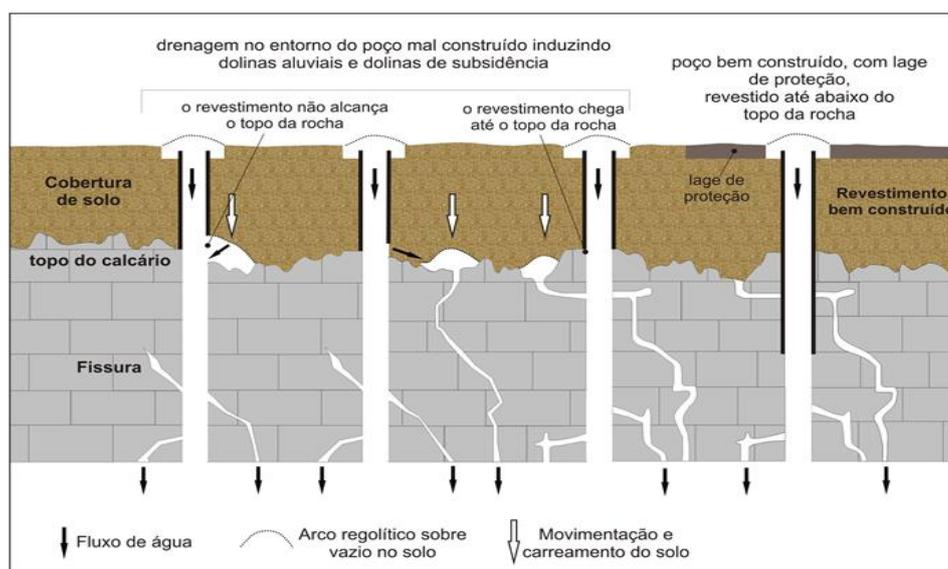
**Figura 11.9: Riscos associados ao carste coberto, onde existe um sistema de condutos conectados ao solo e as cavidades, posicionados próximos a superfície e nível de água na base do solo – Cenário D.**

O quadro D4 mostra um risco semelhante, ainda que a edificação seja muito menor do que aquela mostrada em D3. A superexploração do aquífero drenou toda a água da cavidade e da camada superior do solo. Sedimentos foram carreados para dentro da cavidade. Essa movimentação já é suficiente para acarretar o aparecimento de trincas nas paredes e rachaduras no solo. Entretanto, essa situação pode se agravar se houver o colapso do teto da cavidade.

Nesse caso é muito importante enfatizar os riscos associados à implementação ou abandono de poços com problemas construtivos, que poderiam ainda que não houvesse um aprofundamento do nível de água, causar danos à edificação do cenário D4. A Figura 11.10 ilustra a situação de quatro poços com características construtivas diferentes atravessando um perfil de solo sobre rochas carbonáticas carstificadas. Os poços interceptam uma rede de fissuras e condutos bastante permeáveis.

O primeiro e o segundo poço foram construídos com revestimento apenas nos primeiros metros de solo e na superfície não foi construída a lage de proteção. O terceiro, também sem lage de proteção, tem revestimento até o topo da rocha. Nos três casos, existe a forte tendência de estabelecer uma drenagem no entorno do poço que irá induzir a formação de dolinas aluviais ou de subsidência. Isso ocorre porque a água pode infiltrar no entorno do poço e o próprio vão do poço comunica-se com fraturas e condutos do maciço ligadas ao perfil do solo, permitindo que seja mais fácil o carreamento de sedimento em direção a sub-superfície.

O quarto poço foi construído com a lage de proteção e um revestimento que ultrapassa o perfil de solo e o topo da rocha. A lage de proteção impede a infiltração da água no entorno do poço e o revestimento mais longo evita que exista interação de fluxos hídricos na zona do contato solo-rocha e o vão do poço, deixando mais estável o solo no seu entorno.



**Figura 11.10: Problemas construtivos de poços que aumentam os riscos de aparecimento de trincas, fendas e dolinas no solo. Fonte: Waltham et al, 2005.**

### 11.5.5 Riscos para o cenário E

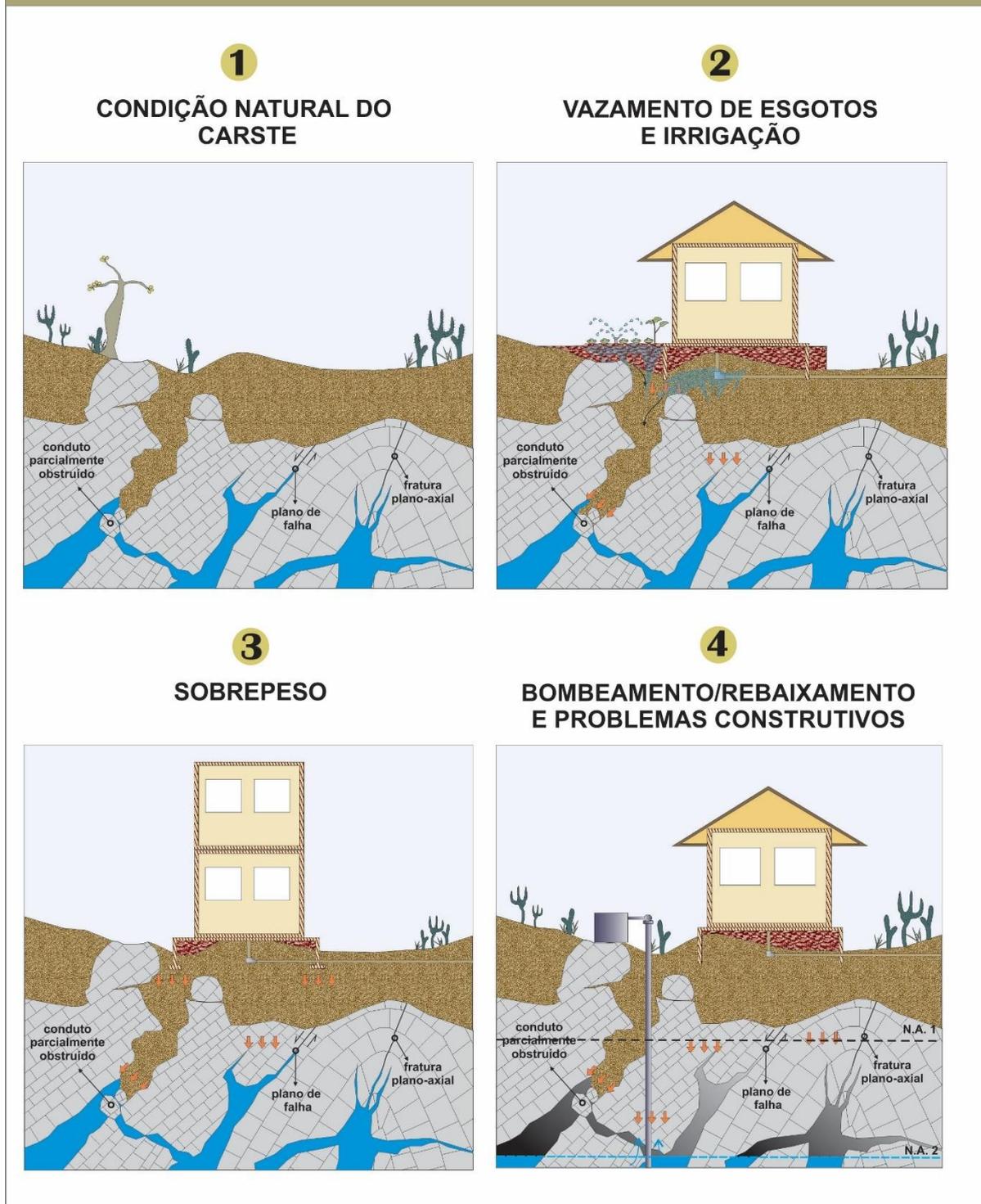
Em E1 a E4 (Figura 11.11) os quadros mostram um carste coberto por uma camada de solo de espessura aproximada de 10 metros. O topo rochoso é bastante irregular, e no perfil de solo existe um sumidouro antigo soterrado e obstruído. O calcário é estratificado e suas camadas estão inclinadas a sub-verticais, fortemente dobradas, sendo seccionadas por um sistema de fraturas abertas plano-axiais e falhas inversas, semelhante aquele ilustrado no cenário B. Em profundidade existe uma rede de condutos ligados a uma cavidade. O nível de água encontra-se em profundidade de aproximadamente 10 m.

De forma semelhante aos casos mostrados anteriormente, nesse contexto geológico, a recarga artificial, o sobrepeso e a superexploração/rebaixamento também são fatores que aumentam o risco de ocorrência de subsidência e colapso.

O sumidouro soterrado representa a existência de uma porção do solo bastante instável sujeitos a recalques e que podem ser reativadas se os condutos e fendas forem lavados e desobstruídos, como, por exemplo, no caso de ocorrência de vazamentos na rede de esgoto (quadro E2). O sobrepeso das edificações pode provocar um recalque do solo e basculamento da construção (quadro E3), e talvez forçar os sedimentos para dentro dos condutos forçando a desobstrução. O aprofundamento do nível de água diminui a estabilidade dos solos, facilitando o movimento dos sedimentos para o interior dos vazios subterrâneos (E4). Os cenários E2 a E4 são muito frágeis e oferecem riscos graves, já que tem potencial para movimentação de uma grande massa de solo.

Condições geológicas semelhantes a essa mostrada nos quadros dos cenários D e E podem ser encontradas nas áreas de alto índice de carstificação mostradas nesse estudo e que coincidem com áreas sem afloramento de rocha e áreas de cultivos. Nessas áreas normalmente existe uma camada de solo mais espessa sobre a rocha carbonática, que pode estar intensamente carstificada. Muitos dos cultivos utilizam poços para irrigação aumentando muito o risco de ocorrência de subsidência e colapso cárstico, especialmente nos casos de poços mal construídos ou de vazões elevadas.

## CENÁRIO E



**Figura 11.11: Riscos associados ao carste coberto, existindo no maciço rochoso falhas e fraturas onde houve o desenvolvimento de um sistema de condutos e cavernas conectados a superfície. Existe ainda um sumidouro soterrado com um conduto parcialmente obstruído – Cenário E.**

### **11.5.6 Riscos para o cenário F**

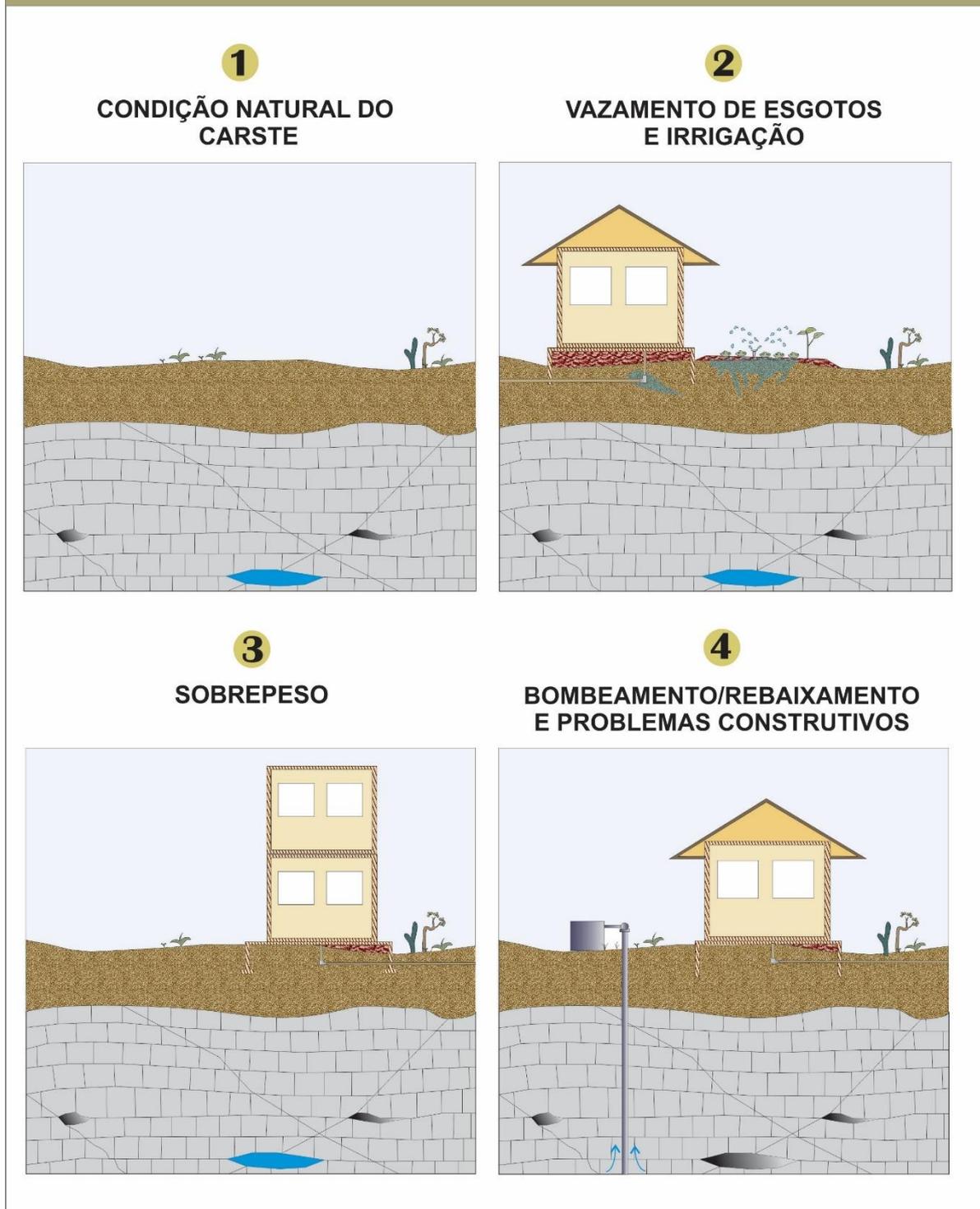
Em F1 a F4 (Figura 11.12) o substrato é formado por uma camada de solo de aproximadamente 20 m, que recobre o calcário estratificado, com camadas horizontais a sub-horizontais, levemente onduladas, sendo seccionado por um sistema de fraturas fechadas. Em maior profundidade há o desenvolvimento de condutos circulares onde os planos de fraturas se cruzam com o plano de acamamento da rocha.

Novamente foram ilustradas condições onde ocorrem recargas artificiais (F2), sobrepeso (F3) e instalação de um poço com rebaixamento do nível de água (F4). Porém, semelhante ao cenário C, nesses casos, os riscos de desenvolvimento dos fenômenos cársticos também são muito baixos a inexistentes.

No solo não existem dolinas ou dolinas soterradas. A rocha está bastante coesa, com poucas estruturas favoráveis a percolação de água. Para que a dissolução produza feições cársticas, ainda sobre efeito da recarga artificial, o processo seria muito lento. Além disso, não existem vazios, na rocha ou no solo, de dimensões suficientes para potencializar qualquer movimentação significativa do terreno.

De forma semelhante às considerações feitas para o cenário C, as zonas de maior estabilidade dos maciços em áreas sem afloramento de rocha devem ocorrer, no contexto do município de Lapão, nas áreas apontadas por Oliveira Filho (2015) e pelos estudos geofísicos apresentados nesse documento como de baixa susceptibilidade a afundamentos cársticos e baixo índice de carstificação. Vale ressaltar que o distanciamento de dolinas, sumidouros, calhas de rios, e de pontos de alto índice de carstificação detectados pela geofísica são características importantes que apontam para áreas de menor risco de colapso e subsidência cárstica, conforme mostra o cenário F.

## CENÁRIO F



**Figura 11.12: Riscos associados a calcários cobertos pouco carstificados – Cenário F.**

## 11.6 Comentários Finais

A cidade de Lapão desenvolveu-se em um contexto geológico estrutural onde naturalmente ocorrem fenômenos de subsidência e colapsos cársticos, com áreas do substrato mais susceptíveis a esses fenômenos e outras naturalmente menos susceptíveis. Entretanto, a ocupação urbana e rural e as intervenções na dinâmica hídrica têm permitido a existência de fatores que aceleram esses fenômenos e deflagram problemas como subsidência de terreno, rachaduras e trincas no assoalho e paredes das construções.

Apesar do atual clima semiárido, o carste desenvolvido sobre os calcários da Formação Salitre apresenta zonas de ocorrências de grandes vazios na rocha e uma paisagem que revela a atuação de processos de dissolução comuns no desenvolvimento do carste, tendo sido esse sistema desenvolvido, em sua maior parte, em um clima mais úmido pretérito. Em geral, a superfície do carste da bacia de Irecê é plana a levemente ondulada, com áreas de rocha exposta ou sob uma cobertura detrítica pouco espessa, com frequente presença de depressões fechadas. Muitas drenagens apresentam leito seco, sendo a maior parte do fluxo subterrâneo.

Os danos às edificações registrados nos últimos anos em Lapão trouxeram grande preocupação à população e aos órgãos públicos. Muitos estudos foram conduzidos a fim de compreender a ocorrência dos fenômenos cársticos e sua associação com os prejuízos às construções. Os diferentes estudos apontam uma série de fatores que favorecem a ocorrência dos fenômenos cársticos em Lapão, como: presença de cavidades próximas à superfície, rebaixamento do nível d'água pela instalação de um regime regional de superexploração, recarga artificial devido a vazamentos de esgoto e irrigação, ocupação desordenada em áreas de elevada susceptibilidade natural aos fenômenos.

As causas apontadas na literatura, conforme mostram os trabalhos de Ramos *et al* (2007), INGÁ (2009), Santos *et al* (2009), Maia *et al* (2010) e Oliveira Filho & Bispo (2015), constroem um cenário de risco em que diferentes aspectos se somam, tanto naturais quanto antrópicos. Existem muitas informações sobre o contexto geológico e as características peculiares da região de Lapão que precisam ser organizadas de forma sistemática para subsidiar estudos específicos que são requeridos.

Os estudos que já foram executados apontam causas de relevância, que são descritas na literatura e estão associadas à deflagração de fenômenos cársticos e acidentes em vários lugares do Brasil e do mundo.

Importante ressaltar, entretanto, que múltiplos cenários podem surgir da interação dos fatores deflagradores e o contexto natural do ambiente cárstico, e para cada um deles uma percepção de risco diferente pode ser aplicada. Mesmo dentro de uma avaliação inicial conceitual, um passo grande pode ser dado quando se identificam cenários onde o carste é favorável à ocupação e o mapeamento das áreas para o planejamento da expansão da cidade.

Oliveira Filho & Bispo (2015) deram um importante passo no sentido de orientar a gestão da urbanização de Lapão, como visto acima. Um segundo passo, não menos importante, consistiu na abordagem geofísica por eletrorresistividade (ver item 5.2.2) feita no âmbito do presente estudo do Carste São Francisco. A

área coberta nesta abordagem foi de 22 km<sup>2</sup>, incluindo toda a zona urbana de Lapão e áreas circunvizinhas. Enquanto os estudos geofísicos anteriores focaram áreas localizadas da zona urbana de Lapão, o estudo realizado pelo Consórcio foi mais contínuo espacialmente e cobriu uma área muito maior. Os resultados desse estudo (ver detalhes no item 5.2.2) levaram a propor um mapa de risco geotécnico, mostrado na Figura 11.13.

São quatro áreas consideradas de baixo risco, designadas de A, B, C e D. No mapa da Figura 11.13 se observa que todos os cantos ou esquinas dessas áreas são identificados. A Tabela 11.3 abaixo relaciona as áreas de baixo risco, seus cantos e respectivas coordenadas. Dessa forma torna-se fácil o estaqueamento desses cantos no campo para delimitação das áreas mapeadas. Espera-se que essas informações possam ser úteis à Prefeitura de Lapão e também ao avanço dos estudos dos abatimentos de terreno.

**Tabela 11.3 – Coordenadas dos cantos das áreas seguras (Datum: WGS84).**

ÁREA	CANTO	UTM L	UTM W
A	A1	189.512,61	8.741.638,06
	A2	190.265,93	8.741.643,44
	A3	190.265,93	8.740.906,26
	A4	190.115,27	8.740.900,88
	A5	190.120,65	8.740.588,79
	A6	190.383,80	8.740.592,53
	A7	190.379,76	8.740.321,67
	A8	190.161,45	8.740.317,62
	A9	190.157,41	8.739.804,20
	A10	189.502,49	8.739.796,11
	A11	189.522,70	8.740.066,97
	A12	189.995,70	8.740.066,97
	A13	189.995,70	8.740.754,24
	A14	189.850,16	8.741.061,48
	A15	189.506,53	8.741.057,44
B	B1	190.784,03	8.741.647,68
	B2	191.628,96	8.741.631,51
	B3	191.624,92	8.741.037,23
	B4	191.115,54	8.740.911,90
C	C1	192.150,47	8.741.639,59
	C2	192.619,43	8.741.639,59
	C3	192.619,43	8.740.479,33
	C4	191.503,64	8.740.475,29
	C5	191.523,85	8.740.746,15
	C6	191.932,17	8.740.689,55
	C7	192.158,56	8.740.992,76
D	D1	190.258,76	8.739.159,60
	D2	190.261,80	8.740.052,58
	D3	190.550,35	8.740.052,58
	D4	190.568,57	8.739.672,91
	D5	191.276,28	8.739.663,80
	D6	191.288,42	8.739.153,52
	D7	191.057,59	8.739.165,67
	D8	191.060,62	8.739.493,71
	D9	190.778,15	8.739.505,86
	D10	190.772,07	8.739.381,33
	D11	190.404,55	8.739.375,25
	D12	190.407,59	8.739.162,64

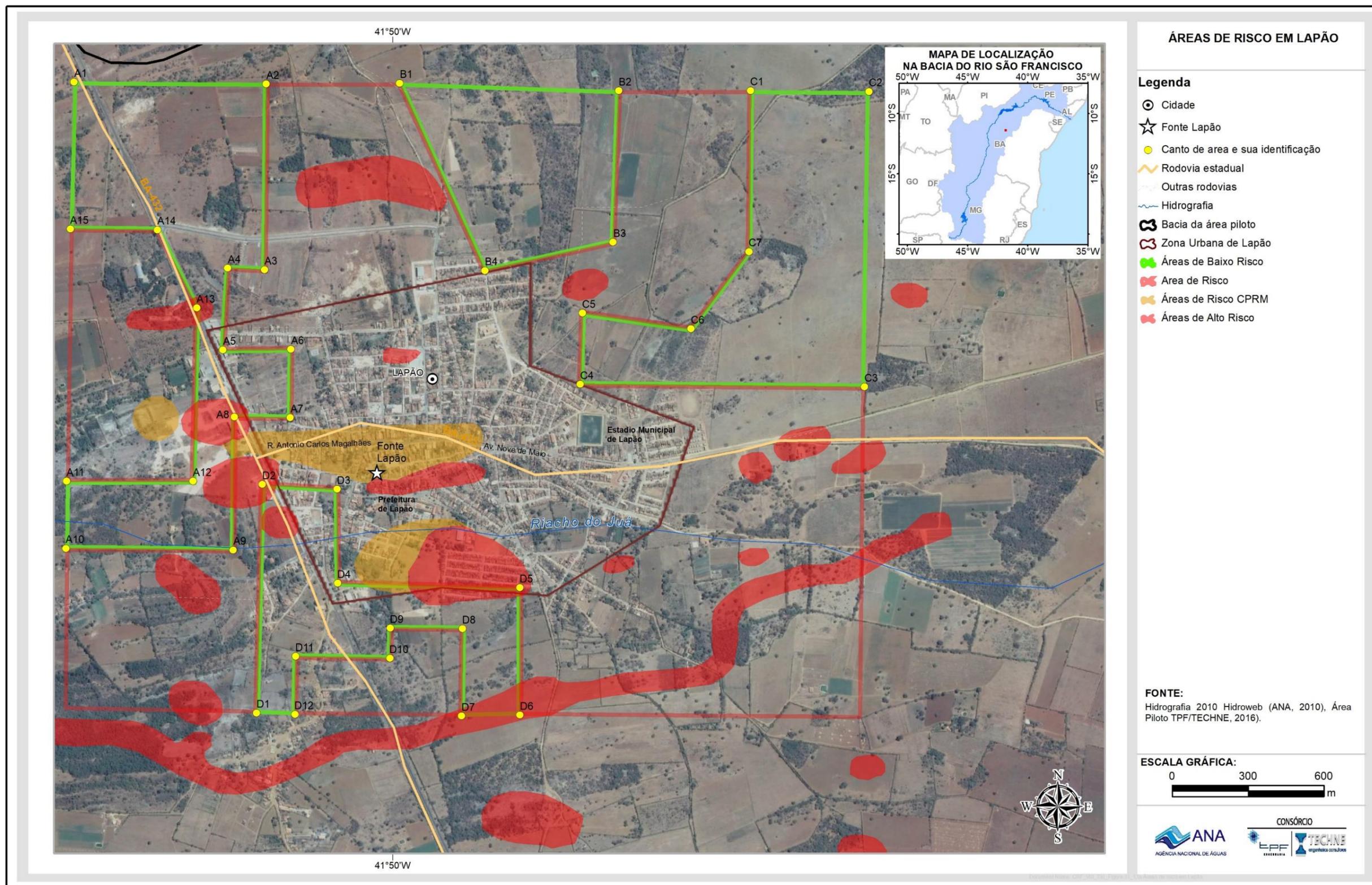


Figura 11.13: Áreas de risco em Lapão.

No mapa da Figura 11.13 foram colocados os resultados dos estudos anteriores realizados. Os seguintes comentários são pertinentes:

- Após os estudos gravimétricos iniciais da UFBA (Santos *et al*, 2009), a CPRM realizou dois estudos por eletrorresistividade (Brito *et al*, 2013a e 2013b) utilizando a técnica dipolo-dipolo. Esses estudos foram muito pontuais, enfocando os locais onde ocorreram abatimentos do terreno e rachaduras.
- O estudo de Oliveira (2015) cobriu uma área de 16 km<sup>2</sup>. Os estudos geofísicos por resistividade, realizados pela CPRM ((Brito *et al*, 2013a e 2013b) foram reanalisados mas sempre localmente, sem uma interpretação integrada. Esta, aliás, não seria possível dado o caráter muito pontual das medições. Foi possível, por outro lado, discernir estruturas cársticas localizadas. Na delimitação das áreas de risco (baixo, médio e alto), Oliveira (2015) valeu-se menos da geofísica que da constatação em campo de estruturas cársticas, do mapeamento de dolinas em um mapa topográfico detalhado, e da análise de aerofotos.
- Em oposição ao estudo de Oliveira (2015) o Consórcio valeu-se extensivamente da resistividade na delimitação das zonas de alto risco e baixo risco, dado seu caráter de varredura sistemática e extensiva (ver Figura 5.33). A elaboração de um mapa de dolinas, entretanto, foi também aqui de grande valia. No presente estudo foi, assim, adotado um enfoque mais integrado e mais regional que os estudos realizados pela CPRM (Brito *et al*, 2013a e 2013b). No presente estudo, se a delimitação de grandes áreas mais carstificadas pode ser considerada verosímil, carstificações de pequeno porte podem ter passado despercebidas ou se manifestam muito discretamente.

Os resultados obtidos levam a sugerir as seguintes recomendações para a continuidade dos estudos.

- A identificação e o mapeamento preciso das dolinas requer a elaboração de um mapa topográfico de precisão da área coberta pela resistividade no presente estudo (22,0 km<sup>2</sup>), com curvas de nível de metro em metro ou menos, com escala proposta de 1/10.000 ou 1/20.000.
- Considera-se fundamental um mapeamento litológico detalhado da área de Lapão utilizando-se como base o mapa topográfico acima recomendado.
- Uma vez mapeadas todas as dolinas da área, com a precisão requerida, recomenda-se uma reanálise das trincas conhecidas e de novas feições que possam surgir, buscando entender suas relações com as citadas dolinas. A abordagem geomecânica de Lins *et al* (2015) nos parece merecedora de atenção.
- É recomendável a perfuração de poços de pesquisa de acordo com recomendação da tabela 5.4 (item 5.2.2.4). Dentre essas alternativas devem ser eleitas algumas que coincidem com dolinas e outras que não coincidam com essas estruturas. Esses poços visam essencialmente aferir o grau de carstificação dos calcários e o preenchimento de dolinas colapsadas.

- As “Áreas de risco em Lapão” (Figura 11.13) bem como as propostas de (Oliveira, 2015) devem ser levadas em conta na expectativa de que, com a continuidade dos estudos e a evolução do conhecimento do comportamento cárstico da região de Lapão, a definição dessas áreas seja otimizada.

Muitas cidades desenvolvem-se sobre um substrato carstificado, mas o contexto do carste define uma forma diferente de gestão e desenvolvimento urbano que precisa ser respeitada para que a cidade não sofra as consequências. O avanço do conhecimento dos fenômenos cársticos em Lapão e o desenvolvimento das estratégias de gestão do risco e proteção da população depende de um conhecimento hidrogeológico e geotécnico incorporado nas políticas do município. Assim, além das recomendações acima listadas, é importante também adotar as seguintes medidas:

- Tomada de providências visando ao estabelecimento de um programa de monitoramento hidrogeológico e do monitoramento de vibrações. Além disso, deve ser feito um investimento na avaliação geotécnica das áreas onde o substrato geológico já aponta fragilidades e, também, no melhor conhecimento do substrato de áreas estratégicas de maior adensamento, como escolas, hospitais e grandes edificações.
- O cadastro de poços a cada dois anos, a gestão do uso da água, a regularização de fossas e a revitalização da rede de esgoto são ações que devem ser tomadas pelo município junto com campanhas de conscientização e fiscalização.
- Regulamentação de todos os usuários de água subterrânea
- Implementação de campanhas de esclarecimento e de fiscalização com apoio do governo municipal.
- Sinalização das áreas de risco com placas bem visíveis descrevendo os riscos potenciais à população e as restrições de atividades.

O êxito na ocupação humana em áreas que oferecem riscos naturais depende do conhecimento profundo dos processos físicos, químicos e/ou biológicos que se relacionam a esses riscos e às formas de interferência antrópica que aumentam ou diminuem as condições potenciais de ocorrência de acidentes ou que agravam as consequências decorrentes desses acidentes.

De forma semelhante, dadas as restrições quanto ao uso da água subterrânea nos cenários apresentados para a região de Lapão, a ocupação humana só poderá ser bem sucedida quando for planejada e seu crescimento for pautado em ações estratégicas tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista do equilíbrio ambiental.

## 12. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A área piloto do Juá corresponde à bacia hidrográfica do riacho do Juá, com uma área de aproximadamente 966 km<sup>2</sup>. Limita-se a leste pelo meridiano 41°40'11" e a oeste pelo meridiano 42°77'00". Os paralelos 11°21'48" e 11°34'23" a limitam a norte e a sul respectivamente. Localiza-se na região norte do estado da Bahia, incluindo partes dos municípios de Irecê, Lapão, Uibaí, Presidente Dutra, Ibititá, João Dourado e América Dourada. O principal aquífero que ocorre nessa área é o Aquífero Salitre, cárstico, desenvolvido nos primeiros 120 metros da Formação Salitre do Grupo Una. Ocorrem também, no extremo oeste da área piloto, quartzitos e arenitos da Formação Morro do Chapéu do Grupo Chapada Diamantina. Essas rochas têm, entretanto, importância secundária como aquífero, pois que ocorrem em altas cotas, constituindo a Serra de Uibaí.

Vulnerabilidade alta ocorre em 73% da área piloto. Vulnerabilidades, baixa e média, ocorrem em, respectivamente, 21% e 6% dessa área. Postos de combustível, esgotamento sanitário, cemitérios e lixões, constituem as fontes contaminantes que, quando situadas em áreas de vulnerabilidade alta, acarretam alto perigo de contaminação.

Quatro direções preferenciais de fraturamento NE-SW, NW-SE, N-S e L-W foram identificadas. Os resultados da eletrorresistividade e de um mapeamento de dolinas sugerem que as duas primeiras direções favorecem preferencialmente o desenvolvimento de estruturas cársticas. As maiores vazões de poços, por sua vez, se distribuem segundo um alinhamento NE-SW. O conjunto de evidências sugere, enfim, este alinhamento como o mais importante no condicionamento da carstificação.

As águas subterrâneas apresentam de um modo geral, para a maioria das amostras avaliadas, teores de STD, dureza, cloreto e nitrato acima dos valores máximos permitidos para consumo humano. Essas águas encontram-se, em realidade, comprometidas desde o final da década de 1970, com índices de nitrato e cloreto preocupantes. Não foi constatada a presença de agroquímicos em nenhuma das amostras avaliadas.

As reservas de saturação são de 6.360,00 hm<sup>3</sup>, a recarga a partir das chuvas é de 7,15 hm<sup>3</sup>/ano, e a descarga de exploração recomendável é de 2,14 hm<sup>3</sup>/ano.

A produção atual de água subterrânea é avaliada em 115,00 hm<sup>3</sup>/ano, sendo, portanto, muito superior à descarga máxima recomendável de 2,14 hm<sup>3</sup>/ano. Esse resultado caracteriza o regime de exaustão atualmente em curso na região de Irecê, com os níveis d'água mais e mais profundos a cada ano. A produção de água subterrânea é utilizada essencialmente na agricultura irrigada. A produção atual dos poços, acima mostrada, parece, à primeira vista, compatível com demanda teórica calculada para irrigação (131,0 hm<sup>3</sup>/ano em 2015).

O abastecimento público das sedes municipais da área piloto e do seu entorno é feito através da chamada Adutora do São Francisco que, desde maio/2013, leva 19,71 hm<sup>3</sup>/ano de água do rio São Francisco, de Xique-Xique, a 132 km de distância. Essa descarga atende satisfatoriamente à demanda atual das principais cidades da área piloto e do seu entorno, com água tratada de boa

qualidade físico-química. A participação da água subterrânea no abastecimento público é ínfima, limitada a alguns distritos, pequenas comunidades rurais, sedes de fazendas e moradias rurais em geral.

Foi realizado um balanço, no âmbito da área piloto, entre a recarga do aquífero e a descarga bombeada pelos poços. O zoneamento desse balanço mostra saldo negativo em, praticamente, toda a área piloto, à exceção do seu extremo oeste, ocupado pela Serra do Uibaí. Esse saldo negativo é mais pronunciado ao longo de uma faixa que, de oeste para leste, perlonga o vale do riacho do Juá, incluindo as localidades de Mata Verde, Tanquinho, Lapão, Aguada Nova, e Gameleira dos Crentes. Essa é a faixa que concentra os bombeamentos mais intensos para manutenção da agricultura irrigada. Não existe, portanto, superávits na área em estudo. O Aquífero Salitre na área piloto do riacho do Juá vivencia, com efeito, um acentuado regime de sobreexploração de água subterrânea.

As análises efetuadas sugerem fortemente que este regime de sobreexploração é agravado pelas pluviometrias insuficientes que afligem a região desde 2010. A análise das variações das superfícies potenciométricas decenais, em particular, mostra que o armazenamento de água subterrânea no Aquífero Salitre acompanha as flutuações de longo termo da pluviometria, embora essa relação não seja tão nítida como na bacia do rio do Vieira. Acenase, entretanto, para uma atenuação significativa da crise hídrica na medida em que voltem a ocorrer períodos chuvosos generosos.

Destaca-se, neste relatório, uma extensiva análise dos riscos geotécnicos a que está submetida a cidade de Lapão. Esta análise incluiu um estudo geofísico por eletrorresistividade realizado numa área de 22,0 km<sup>2</sup> incluindo a área urbana da cidade de Lapão e seus arredores. Esse estudo apresentou, essencialmente, um zoneamento das áreas de grande variabilidade elétrica que correspondem às áreas mais intensamente carstificadas. Apresentou também um zoneamento de dolinas. Esses dois zoneamentos conduziram à elaboração de um mapa de risco geotécnico destinado a orientar a Prefeitura de Lapão na expansão urbana da cidade. As áreas consideradas de baixo risco são indicadas no mapa apresentado.

Em vários trechos do relatório recomendam-se medidas vitais requeridas do órgão gestor da Bahia, para que se possa tomar as rédeas da exploração de água subterrânea na região de Irecê e iniciar um efetivo processo de gestão. É recomendada, em particular, a implantação de sistemas de monitoramento de níveis e descargas, nas áreas mais críticas da área piloto, visando a manter a exploração sob controle.

### 13. PROPOSTAS DE GESTÃO

A zona urbana de Lapão vem há anos sofrendo problemas de rachaduras do solo e de construções provocados pelo comportamento cárstico dos calcários. Os estudos realizados no presente projeto deram suporte a elaboração de um mapa de risco geotécnico da área, apresentado na Figura 13.1.

São quatro áreas consideradas de baixo risco, designadas de A, B, C e D, apresentadas na Tabela 13.1, relacionando as áreas de baixo risco, seus cantos e respectivas coordenadas. O estaqueamento desses pontos permite a delimitação das áreas mapeadas. Essas informações devem ser úteis aos órgãos gestores, à Prefeitura de Lapão e também ao avanço dos estudos dos abatimentos de terreno.

As seguintes ações de avanço no conhecimento técnico científico são recomendadas para fazer face à problemática dos abatimentos de terreno em Lapão:

- Em primeiro lugar considera-se prioritário, e da maior relevância, que se ponha em prática a recomendação de Dias Neto & Maia (2009) no que diz respeito à criação de um Núcleo de Estudos Hidrogeológicos objetivando o acompanhamento permanente da problemática cárstica de Lapão. Essa iniciativa foi objeto da Portaria nº 420/09-DG do INGA, publicada no Diário Oficial do estado da Bahia em 09/06/2009.
- A identificação e o mapeamento preciso de dolinas requer a elaboração de um mapa topográfico de precisão da área coberta pela resistividade no presente estudo (22,0 km<sup>2</sup>), com curvas de nível de metro em metro ou menos. A escala desse mapa topográfico deve ser 1/10.000 ou 1/20.000, a ser decidido.
- Considera-se fundamental um mapeamento litológico detalhado da área de Lapão utilizando-se como base o mapa topográfico acima recomendado.
- Uma vez mapeadas todas as dolinas da área, com a precisão requerida, recomenda-se uma reanálise das trincas conhecidas e de novas feições que possam surgir, buscando entender suas relações com as citadas dolinas. A abordagem geomecânica de Lins et al (2015) nos parece merecedora de atenção.
- É muito recomendável a perfuração de poços de pesquisa bem construídos e bem acompanhados. Alguns desses poços devem coincidir com dolinas e outros devem ficar fora dessas estruturas. Esses poços visam essencialmente aferir o grau de carstificação dos calcários e o preenchimento de dolinas colapsadas.
- As “Áreas de risco em Lapão” (Figura 13.1) bem como as propostas de (Oliveira, 2015) devem ser levadas em conta na expectativa de que, com a continuidade dos estudos e a evolução do conhecimento do comportamento cárstico da região de Lapão, a definição dessas áreas seja otimizada.

**Tabela 13.1 – Coordenadas dos cantos das áreas de baixo risco (Datum: WGS84)**

ÁREA	CANTO	UTM L	UTM W
A	A1	189.512,61	8.741.638,06
	A2	190.265,93	8.741.643,44
	A3	190.265,93	8.740.906,26
	A4	190.115,27	8.740.900,88
	A5	190.120,65	8.740.588,79
	A6	190.383,80	8.740.592,53
	A7	190.379,76	8.740.321,67
	A8	190.161,45	8.740.317,62
	A9	190.157,41	8.739.804,20
	A10	189.502,49	8.739.796,11
	A11	189.522,70	8.740.066,97
	A12	189.995,70	8.740.066,97
	A13	189.995,70	8.740.754,24
	A14	189.850,16	8.741.061,48
	A15	189.506,53	8.741.057,44
B	B1	190.784,03	8.741.647,68
	B2	191.628,96	8.741.631,51
	B3	191.624,92	8.741.037,23
	B4	191.115,54	8.740.911,90
C	C1	192.150,47	8.741.639,59
	C2	192.619,43	8.741.639,59
	C3	192.619,43	8.740.479,33
	C4	191.503,64	8.740.475,29
	C5	191.523,85	8.740.746,15
	C6	191.932,17	8.740.689,55
	C7	192.158,56	8.740.992,76
D	D1	190.258,76	8.739.159,60
	D2	190.261,80	8.740.052,58
	D3	190.550,35	8.740.052,58
	D4	190.568,57	8.739.672,91
	D5	191.276,28	8.739.663,80
	D6	191.288,42	8.739.153,52
	D7	191.057,59	8.739.165,67
	D8	191.060,62	8.739.493,71
	D9	190.778,15	8.739.505,86
	D10	190.772,07	8.739.381,33
	D11	190.404,55	8.739.375,25
	D12	190.407,59	8.739.162,64

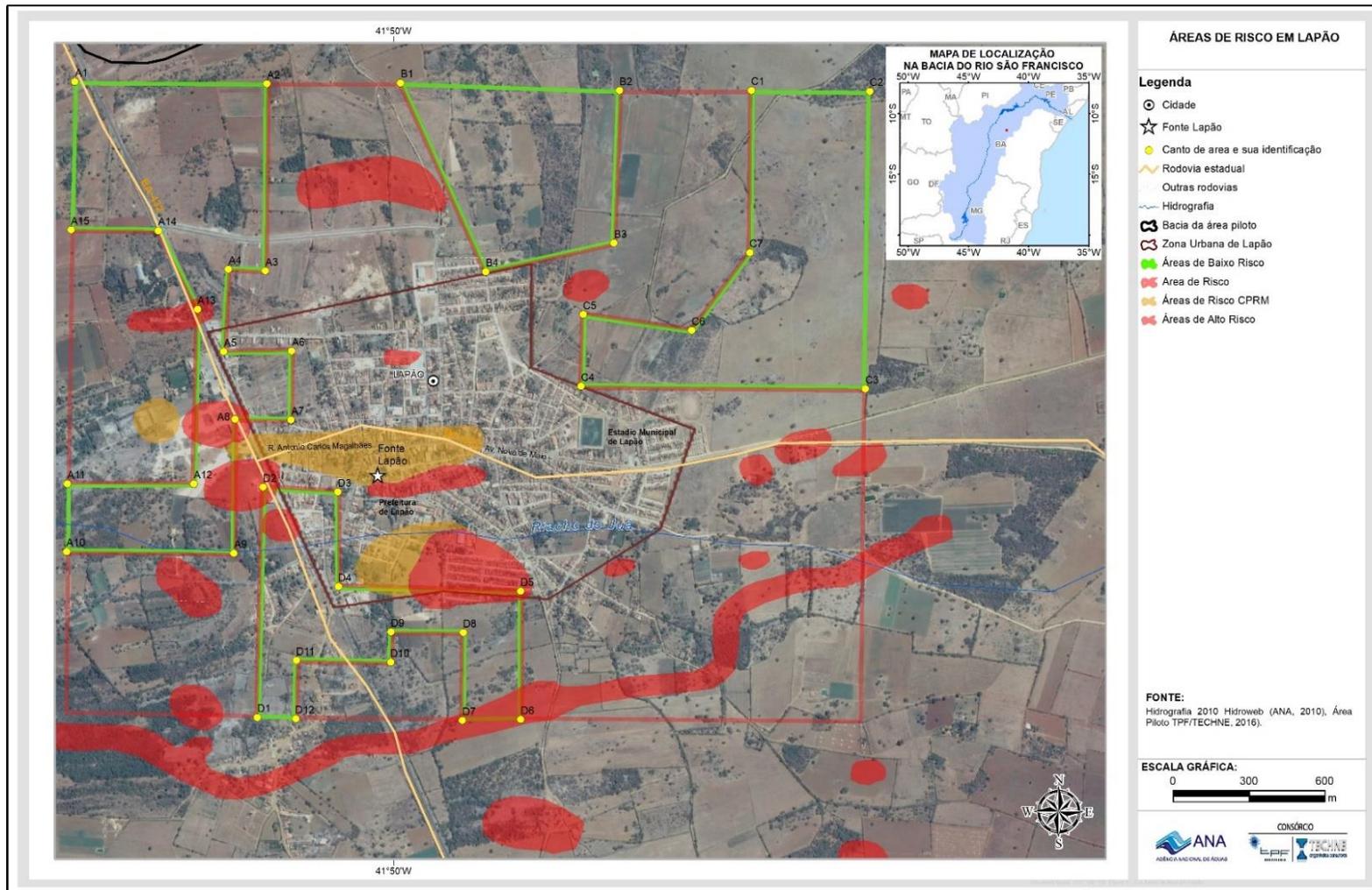


Figura 13.1: Áreas de maior risco e áreas de baixo risco em Lapão.

As condições acima indicadas deverão exigir procedimentos de gestão bem mais rigorosos, onde é vital a disponibilidade de uma rede de monitoramento espacialmente planejada, tanto do ponto de vista hidrológico quanto do ponto de vista hidrogeológico, salientando-se naturalmente a necessidade de implantação de um forte controle do uso da água subterrânea, da perfuração de novos poços tubulares e do inventário de uso atual das águas subterrâneas.

O mapa de zoneamento da exploração apresentado evidenciou déficit hídrico em 74% das células. A situação mais crítica ocorre nas células: 10 (-0,040 m<sup>3</sup>/s), 11 (-0,023 m<sup>3</sup>/s), 12 (-0,048 m<sup>3</sup>/s), 13 (-0,044 m<sup>3</sup>/s) e 14 (-0,037 m<sup>3</sup>/s). O déficit total encontrado na área é de 324 L/s ou 28.003,00 m<sup>3</sup>/dia, para uma recarga de 7,4 mm/ano equivalente a cerca de 20 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.dia. Existe excedente apenas nas células 1, 7, 8, 9, 14 e 20, correspondentes aos quartzitos da Serra do Uibaí (Grupo Chapada Diamantina).

Nas células deficitárias é recomendável a implantação de dispositivos de monitoramento automático permanente de níveis e descargas dos poços para a aquisição de dados com o objetivo de limitar com segurança as retiradas superiores à reserva explotável, que serve de referência para as outorgas de água subterrânea.

Além da aplicação das medidas descritas acima, o monitoramento qualitativo é fundamental para a região. Os resultados físico-químicos oriundos das duas campanhas de amostragem realizadas mostraram que as águas são sempre muito duras, com parâmetros de STD, cloreto, fluoreto, nitrato e ferro acima dos padrões de qualidade (Portaria 2914/11) em algumas amostras.

A Tabela 13.2 e Figura 13.2 apresentam a localização dos poços que deverão compor a rede de monitoramento na Bacia do Riacho do Juá.

**Tabela 13.2 – Coordenadas dos poços de monitoramento da rede da Bacia do Riacho do Juá.**

Poços de Monitoramento	Coordenadas X	Coordenada Y
PM01	-42,0448	-11,3931
PM02	-41,9487	-11,3834
PM03	-41,8892	-11,4138
PM04	-41,7930	-11,3889
PM05	-41,7716	-11,4131
PM06	-41,9238	-11,5162
PM07	-42,0109	-11,5238
PM08	-42,0109	-11,4581

Em face do acima exposto, as seguintes ações de gestão são recomendadas para o controle da exploração de água subterrânea:

- Recomenda-se **realizar periodicamente o cadastro de poços** (a cada dois anos).

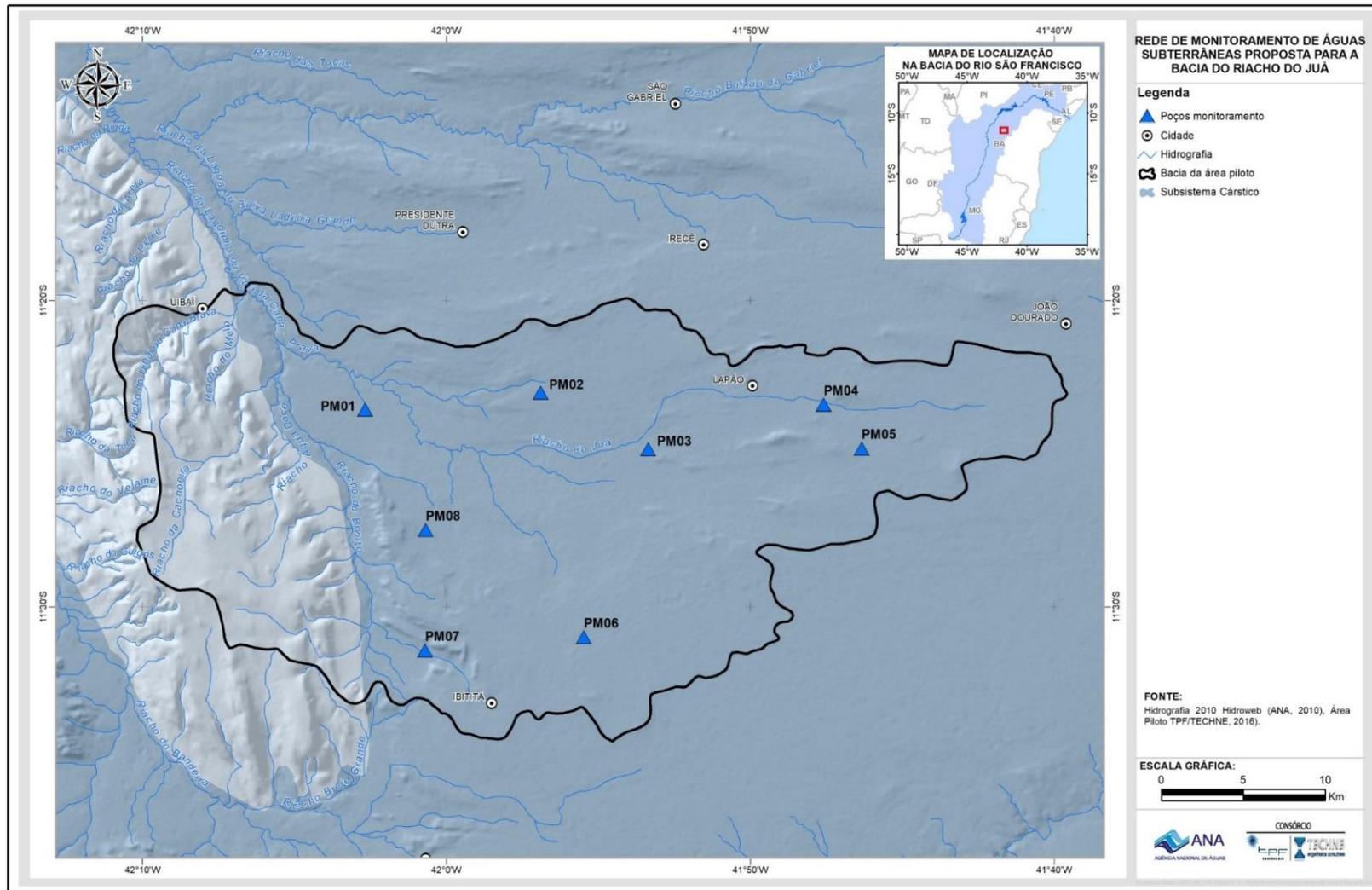
- Recomenda-se, ainda, a regulamentação de todos os usuários (dispensa ou outorga) e a **proibição de novas perfurações de poços por um período mínimo de 02 anos.**
- Implementar **campanhas constantes de fiscalização** em parceria com os órgãos gestores estaduais e municipais.
- **Sinalizar as áreas de riscos com placas bem visíveis que contenham frases de “efeito” descrevendo os riscos potenciais à população e as restrições de atividades;**
- Realocar a população das áreas de alto risco para outras localidades mais seguras. Além disso, deve ser feito um **investimento na avaliação geotécnica das áreas** onde o calcário já aponta fragilidades, particularmente em áreas de maior adensamento, como escolas, hospitais e grandes edificações.

Muitas cidades desenvolvem-se sobre rochas carstificadas, mas o contexto do carste requer uma forma diferente de gestão e desenvolvimento urbano que precisa ser respeitada para que os riscos sejam minimizados. O avanço do conhecimento dos fenômenos cársticos em Lapão e o desenvolvimento das estratégias de gestão do risco e proteção da população depende de um conhecimento hidrogeológico e geotécnico incorporado nas políticas do município.

O êxito da ocupação humana em áreas que oferecem riscos naturais depende de um conhecimento satisfatório dos processos físicos, químicos e/ou biológicos que se relacionam a esses riscos e à interferência antrópica que aumentam ou diminuem as condições potenciais de ocorrência de acidentes ou que agravam as consequências decorrentes desses acidentes.

De forma semelhante, dadas as restrições quanto ao uso da água subterrânea nos cenários apresentados para a região de Lapão, a ocupação humana só poderá ser bem-sucedida quando for planejada e seu crescimento for pautado em ações estratégicas tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista do equilíbrio ambiental.

Isto deverá tornar os procedimentos de gestão bem mais rigorosos, recorrendo-se inicialmente a uma rede de monitoramento espacialmente planejada, tanto do ponto de vista hidrológico quanto do ponto de vista hidrogeológico, salientando-se naturalmente a necessidade de implantação de um forte controle do uso da água subterrânea, da perfuração de novos poços tubulares e do inventário de uso atual das águas subterrâneas.



**Figura 13.2 – Rede de monitoramento proposta para a Bacia do Riacho do Juá.**

## 14. Referências bibliográficas

- Aksoy, H.; Wittenberg, H.; ERIS, E. Hydrograph Analysis and Baseflow Separation. In: Handbook of Engineering Hydrology: Fundamentals and Applications, pp. 311-328. 2014.
- Alemayehu, T.; Leis, A.; Eisenhauer, A.; Dietzel, M. 2011. Multi-Proxy Approach (2H/H, 18O/16O, 13C/12C and 7Sr/86Sr) for the evolution of carbonate-rich groundwater in basalt dominated aquifer of Axum area, northern Ethiopia, *Chemie der Erde-Geochemistry*, in Press.
- Alheiros, M., 1996. Avaliação econômica de perdas ambientais na análise de riscos geológicos. Anais do 1º encontro nacional da ECOECO. Campinas: ECOECO p. 01 – 03.
- Allen, J.R.L. Notes on the Geological Character of the Country Between Xique-Xique on the Rio São Francisco and Bahia, Brazil. In: Hartt's Geology and Physical Geography of Brazil, p. 303-308. 1870.
- Allkmin, F.F e Martins-Neto, M.A. 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. 2001.
- ANA - Agência Nacional de Águas, 2006. Atlas do Nordeste – Abastecimento Urbano de água. Alternativas de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Solicitação de propostas. SDP nº 01/13. Acordo de empréstimo 8074/BR, Banco Mundial. 2013.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Topologia Hídrica: Método de Construção e Modelagem da Base Hidrográfica para Suporte à Gestão de Recursos Hídricos – Versão 1.11. Brasília, ANA, SGI – Superintendência de Gestão da Informação, 29 p. 2006.
- ANA, 2013. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil.
- APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21. ed. Washington: APHA, 2005. . Washington: American Public Health Association. 1082 p.
- Auler, A.S. Karst Evolution and Palaeoclimate in Eastern Brazil. Ph.D. Thesis, University of Bristol. 1999.
- Auler, A.S.; Smart, P.L.; Wang, X.; Cristalli, P.; Edwards, R.L., 2003. O Calcário Caatinga e os Carbonatos Secundários Superficiais do Norte da Bahia: Geocronologia e Significado Paleoambiental. IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Recife.
- Auler, A; Piló, L. B. Introdução à Espeleologia. Instituto Chico Mendes De Conservação Da Biodiversidade – ICMBio. Centro Nacional De Pesquisa E Conservação De Cavernas - CECAV. Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. Brasília. 2011.

- Auler, S. & Smart, P.L., (s/data). Toca da Boa Vista (Campo Formoso), BA - A maior caverna do hemisfério sul. Sigep-19.
- Azevedo, Adalberto Aurélio. Análise de risco em áreas urbanas edificadas sobre maciços carbonáticos carstificados : o caso do Município de Lapão, BA. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 14., 2013, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: ABGE, 2013. CD. 10 p.
- BAHIA. Plano Estadual de Gestão do Semiárido Baiano (PAE-BA). 2010.
- BAHIA. SEPLAN - Secretaria do Planejamento e SEMA - Secretaria do Meio Ambiente. Zoneamento Ecológico-Econômico Preliminar. Indicação das Unidades Geoambientais e Unidades de Paisagem. Salvador: 2013.
- BAHIA/SRH, citado por Silva, 2005: BAHIA, Governo do Estado da Bahia. Superintendência dos Recursos Hídricos (SRH). Plano Diretor de Recursos Hídricos. Bacias dos Rios Verde e Jacaré. Margem Direita do Lago de Sobradinho, 1995. 119 p. 1995.
- Banner, J. L. 2004. Banner Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 65 (2004) 141 – 194
- Barbosa, J.S.F.; Sabaté, P.; Marinho, M.M., 2003. O Cráton do São Francisco na Bahia: Uma Síntese. *Revista Brasileira de Geociências* 33(1):3-6.
- 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.
- Bastos Leal, L.R. & Silva, H. P. da. (Coord.). Modelização da dinâmica hidrológica e instrumentos para a gestão do sistema aquífero-rio das bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré – região semiárida do estado da Bahia. Relatório técnico final do convênio de cooperação técnico-científica celebrado entre a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a Universidade Federal do Estado da Bahia. 2004, 435p.
- Bastos Leal, L.R. & Negrão, I.F., 2003. Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos do Aquífero Cárstico de Irecê. Roteiro de excursão de campo.
- Bedmar A.P., Silva A.B., Jardim F.G.; Oliveira L.B., 1980. Contribuição de diversas técnicas isotópicas no estudo do aquífero cárstico da região central da Bahia (Irecê-Iraquara). *Revista Brasileira de Geociências*, 10: 104-116.
- Benson, R.C. Yuhr L.; Kaufmann, R.D. Assessing the risk of karst subsidence and collapse. *American Society Civil Engineers Geotechnical Special Publication*. 122 p. 2003.
- Beraldo, V. Estudo isotópico ( $\delta^{2}H\delta^{18}O$ ) e hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas na região de Irecê, Bahia: Contribuição ao entendimento do ciclo hidrológico regional. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 84p. 2005.
- Beraldo, V.J. Avaliação Macroscópica das Feições Cársticas da Formação Salitre na Folha Irecê (SC.24-Y-C-I) como Reservatórios para Água

- Subterrânea. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, São Paulo. 2006.
- Bigarella, J. J.; Becker, R. D.; Santos, G. F. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. In: Paisagem Cárstica, vol 1, ed. UFSC: Florianópolis. cap. 5, p. 241308. 1994.
- Bögli, A. Karst hydrology and physical speleology. Berlin/New York: Springer, 1980.
- Bomfim, L.F. & Pedreira, A.J. Geologia da Chapada Diamantina Oriental, Bahia (Folha Lençóis). In: Bomfim, L.F. & Pedreira, A.J., Orgs, - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Lençóis (Folha SD.24-V-A-V) Estado da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM, p.25-73. 1990.
- Bomfim, L.F.C. & Gomes, R.A.D., 2004. Aquífero Urucuaia - Geometria e Espessura: Idéias Para Discussão. ABAS, XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá, 2004.
- Bomfim, L.F.C.; Rocha, A.J.D.; Pedreira, A.J.; Morais Filho, J.C.; Guimarães, J.T.; Tesch, N.A. Projeto Bacia de Irecê: Relatório Final. Salvador, CPRM/CPM, 2v. (relatório inédito). 1985.
- 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. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. Revista Brasileira de Geografia, 32:3-39. Citado em: Sgarbi G.N.C., Sgarbi P.B. de A. 1970.
- Branner, J.C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. Geological Society of America Bulletin 22: 187-206. 1910.
- Branner, J.C. The Tombador escarpment in the State of Bahia, Brazil. Am. J. Sci. 30:335-343. 1910.
- 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/MMA. Quarto Relatório Nacional para a Convenção Sobre Diversidade Biológica BRASIL. Brasília 2011.
- Brito Neves B. B. Água subterrânea na região central da Bahia, condicionamento e demanda. Recife, CONESP. Relatório Nº 21, 32 p. 1967.
- Brito Neves, B.B. & Silva, A.J.C.L.P. Diamictitos e “Cap Dolomites” Sturtianos Sobre o Grupo Jacobina - Araras, Norte de Campo Formoso – Bahia. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 8, n. 2, p. 11-27. 2008.
- Brito Neves, B.B. A Formação Samburá na Bahia. Boletim de Estudos SUDENE, n.4, p.7- 15. 1968.
- Brito Neves, B.B. Geologia das Folhas de Upamirim e Morro do Chapéu – BA. Relatório Técnico N. 17, SUDENE/CONESP. Recife. 1967.

- Brito Neves, B.B., 1972. Inventário Hidrogeológico do Nordeste, folha 24 – Aracajú-SO. Recife, SUDENE/Departamento de Recursos Naturais, 284 p. II, Série Hidrogeologia, 26.
- Brito Neves, B.B.; Santos, R.A.; Campanha, G.A.C. A discordância angular e erosiva entre os grupos Chapada Diamantina e Bambuí (Una) na folha Mirangaba-Bahia. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 12, n. 2, p. 9-114. 2012.
- Brito, A.A.; Cardoso, A.C.; Oliveira, C.E.S.; Oliveira, C.E.; Cunha, F.L.; Negrão, F.I.; Oliveira Filho, I.B.; Gusmão de Oliveira, R. Ação Emergencial na Cidade de Lapão – BA - Relatório Final Integrado (Levantamento Geofísico, Levantamento Hidrogeológico, Análise De Risco). CPRM/DGM/Superintendência de Salvador, 2013a.
- Brito, A.A.; Oliveira, C.E.S.; Gusmão de Oliveira, R.; Santiago, R.C. Levantamento Geofísico de Eletroresistividade para Investigação do Substrato Calcário de Áreas Colapsadas e de Novas Áreas para Expansão Urbana da Cidade de Lapão-BA. CPRM/DGM/Superintendência de Salvador, 2013b.
- Campos J.E.G & Dardenne M.A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. Rev. Bras. Geoc., 27(3):257-282. 1997b.
- Campos, J.E.G. & Dardenne, M.A. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências 27(3):283-294. 1997.
- Cardoso, F. D., Duarte, E. N., Deleo, J. P. Sabio, R. P. In: Revista Hortifruti Brasil. Ano 14. Nº 147. Junho de 2015. P. 22-38.
- Caxito, F.A.; Uhlein, A.; Dos Santos, Y.L.O.P.; Pedreira, A.J.; Faulstich, F.R.L. A Geologia Entre Macaúbas e Canatiba (Bahia) e a Evolução do Supergrupo Espinhaço no Brasil Oriental. GEONOMOS 16(1): 11 - 20, IGC/UFMG. 2008.
- CERB/CODEVASF. Detalhamento Hidrogeológico na Região do Tareco – Médio Jacaré, Irecê/ Bahia. Relatório Técnico. 1979.
- CERB/CODEVASF. Estudos Hidrogeológicos no Platô de Irecê – BA. Relatório Técnico 3v. – Salvador. 1983.
- Chapman, T. G.: Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon, Water Resour. Res., 27, 1991.
- Collischonn, W.; Tassi, R. 2008. Introduzindo Hidrologia. IPH-UFRGS.
- Corrêa, J. A. *et al* Geologia das Regiões Centro e Oeste de Mato Grosso do Sul - Projeto Bodoquena. Brasília: MME/DNPM. (Série Geologia, 6). 1979.
- COSTA, J.B.S.,1989. Geologia Estrutural. Salvador: CPRM, 1989. (Apostila de Curso). Citado por: MAIA, P. H. P.; DIAS NETO, B.; CORRÊA-GOMES, L. C. Análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências no carste de Lapão. Cadernos de Geociências, v. 7, n.2, 2010.

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil e CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Mapa geológico do estado da Bahia. Escala 1:1.000.000. Carta geológica do Brasil ao Milionésimo. 2003.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Ação Emergencial na Cidade de Lapão - BA. Relatório Final Integrado. Relatório Interno. Salvador, 2013.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado da Bahia. Brasil, 2003. Escala: 1:1.000.000. Disponível em: <[http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.documents.download?usuario=1&file=bahia\\_lito.zip](http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.documents.download?usuario=1&file=bahia_lito.zip)>. Acesso em: 19 ago. 2014.
- Cruz, S. C. P.; Alkmim F. F. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco Craton Region, Eastern Brazil. Anais... Academia Brasileira de Ciência, v.78 p.151-174. 2006.
- Custodio E. & Llamas M.R. Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Ômega, v. 2. 1983.
- Da Luz, J.A.G.; Leal, L.R.B.; Barreto, F.S. Tratamento estatístico dos dados dos poços da região do Platô de Irecê, Bahia. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá/MT. 2004.
- Danderfer Filho, André. Análise Estrutural Descritiva e Cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Geologia – UFOP. 1990.
- Derby, O.A. Notas geológicas sobre o Estado da Bahia. Secr. Agric. Viação Ind. Obr. Publ. Boletim, 7:12-31. 1905.
- Derby, O.A. The Serra do Espinhaço, Brazil. J. Geol.,14:374-401. 1906.
- Dias Neto, B., Maia, P. H. P. Relatório de Visita Técnica ao Carste de Lapão. 2009.
- DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral. v.12, p.254, perfil 16; 1973e, p.337, perfil RS-38. 1976.
- Domenico, P. A., Schwartz, F. W. 1998. Physical and Chemical Hydrogeology (2nd ed.): John Wiley and Sons, Inc, New York, 506 p.
- Drew D, Hötzl H. Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications. Balkema, Rotterdam, 322 pp. 1999.
- Eckhardt, K.: How to construct recursive digital filters for base flow separation, Hydrol. Processes, 19, 507–515, 2005
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. Ed. Brasília, DF: Embrapa - Produção de informação, 2006.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Estudo de correlação de solos para fins de classificação nas regiões do recôncavo

- baiano e microrregião de Irecê-Bahia. Cunha, Tony Jarbas Ferreira *et al* Rio de Janeiro, 2000.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Monitoramento por satélite - Banco de Dados Climáticos do Brasil. Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/referencia.php>. 2003.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. – Brasília, DF, 2013.
- Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Tomo 2, p.629, perfil 74; Brasil, 1973a, p.324, perfil 47. 1984.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro:1979. 83p. (Embrapa-SNLCS. Micelânea, 1).
- Fannin, R.J.; Slangen, P; Mehdizadeh, A.; Disfani, M.M.; Arulrajah A.; Evans, R., 2015. Discussion: On the distinct phenomena of suffusion and suffosion. *Geotechnique Letters*, Volume 5, Issue 3, September, pp. 129-130.
- Feitosa, E.C., 2004. O Aquífero Jandaíra no Município de Baraúna/RN – Atualização dos Conhecimentos. ANA/Pró-Água Semiárido/SERHID RN – FADE/LABHID/UFPE. Recife, relatório inédito. (Zoneamento dos calcários aquíferos e mapeamento das áreas de maior índice de carstificação através do método geofísico de eletrorresistividade).
- Feitosa, E.C., 1975. Reconhecimento geofísico por eletrorresistividade da faixa marginal do Grupo Bambuí na região de Lages do Batata/Morro do Chapéu/Seabra – Bahia (Área D do contrato CONESP/OESA). Relatório inédito..
- Feitosa, F. A. C.; Filho, J. M.; Feitosa, E. C.; e Demetrio, J. G. A. (Coordenadores), 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM - LABHID, 3 Ed, 812p,
- Fetter, C. W. 1994. Applied Hydrogeology. 3ª ed. Oshokosh: University of Winsconsin. 389p.
- Figueiredo, A.L.C. Fácies Carbonáticas e Potencial Reservatório da Formação Salitre Neoproterozóica, na Bacia de Irecê-Bahia, Brasil. Relatório de graduação apresentado ao IG/UFBA. 2011.
- Figueiredo, F.T. Fácies sedimentares e proveniência da Formação Bebedouro, Neoproterozoico (BA). Dissertação de mestrado apresentada ao IG/USP. 2008.
- Ford, D. C.; Williams, P. W. Karst geomorphology and hidrogeology. United Kingdom: Wiley, 2007.
- 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

- Fossen, Haakon. Geologia Estrutural. Traduzido por Fabio R. D. Andrade. Oficina de textos, 1ª Edição, 584 págs.
- Fragoso, D.G.C.; Reis, H.L.S.; Kuchenbecker, M., 2008. Mapeamento Geológico da região de Irecê-Lapão (BA): Registros de uma rampa carbonática neoproterozóica. Trabalho de Graduação. Universidade Federal de Minas Gerais. 109p.
- Fragoso, D.G.C.; Uhlein, A.; Sanglard, J.C.D.; Suckau, G.L.; Guerzoni, H.T.G.; Faria, P.H. Geologia dos Grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na Folha Presidente Olegário (1:100.000), MG: Registro Deposicional do Neoproterozoico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. GEONOMOS 19(1): 28 – 38, IGC/UFMG. 2011.
- Freeze. R.A. & Cherry, J.A. Groundwater. Prentice Hall. 1979.
- FROST, C.D.; TONER, T.N. 2004. Strontium isotopic identification of water-rock interaction and ground water mixing. Ground Water, 42 (3): 418-432.
- GAT. J. R. 1971. Comments on stable isotope method in regional groundwater investigation. Water Resource Research, (7): 980-993.
- Gillieson, D. The caves system and karst. In: Gillieson, D. Caves: processes, development, management. Malden: Blackwell Publishers. p. 1-11. 1996.
- Goldscheider N, Drew D (Eds.). Methods in Karst Hydrogeology. Taylor & Francis, London, 264 pp. 2007.
- Goldscheider, N. Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and Swabian Alb. Karlsruhe: Schr Angew Geol Karlsruhe, 236 f. (Ph.D. Thesis). 2002.
- GOSSELIN, D.C.; HARVEY, F.E; FROST, C.; STOTLER, R; MACFARLANE, P.A. 2004. Strontium isotope geochemistry of groundwater in the central part of Dakota (Great Plains) aquifer, USA. Applied Geochemistry, 19:359-377.
- Guerra, A.M., 1986. Processos de carstificação e hidrogeologia do grupo Bambuí na região de Irecê - Bahia. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 132 p.
- Guimarães, J.T. & Pedreira, A.J. Geologia da Chapada Diamantina Oriental, Bahia. (Folha Utinga). In: Guimarães, J.T. & Pedreira, A.J., orgs. - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Utinga (Folha SD.24-V-A-II) Estado da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM p.19-92. 1990.
- Guimarães, J.T. A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, Estratigrafia e Ambientes de sedimentação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia. 235 p. 1996.
- Guimarães, J.T. A Formação Bebedouro no Estado da Bahia: Faciologia, Estratigrafia e Ambientes de Sedimentação. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geologia da UFBA. 1996.
- Hasui, Y, Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A. Geologia do Brasil. São Paulo: Beca. 900p. 2012.

- Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, v. 56. Boulder. 1945.
- IBGE, 1992. 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. <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=ba>> Acesso em agosto de 2015.
- IBGE, 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico. 2010.
- IBGE, 2017. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006: resultados preliminares
- IBGE, 2006. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de unidades de relevo do Brasil. 1:5.000.000. Rio de Janeiro..
- Inda, H.A.V. & Barbosa, J.F., 1978. Texto explicativo para o mapa geológico do estado da Bahia, escala 1:1.000.000. COM, Salvador.
- INGA – Instituto de Gestão das Águas e Clima. Uma análise preliminar das subsidência e fissuras cársticas no município de Lapão-Bahia, através da realização do cadastro de usuários de recursos hídricos. 2009.
- Jansen, D.C; Cavalcanti, L. F.; Lamblém, H. S. Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000. Revista Brasileira de Espeleologia, Brasília, v. 2, n.1. 2012.
- Jennings, J.N. Karst. Cambridge: Mass & London. 208p. 1971.
- Karmann, I., 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto vale do Rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo. São Paulo: Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 228p. (Tese de Doutorado em Geoquímica e Geotectônica).
- Käss W. Tracing Technique in Geohydrology. Balkema, Rotterdam, 581 pp. 1998.
- Kegel, W. Estudos Geológicos na Zona Central da Bahia - Bol. 198 do DGM-DNPM, Rio. 1959.
- KENDALL, C.; MCDONNELL, J.J (Eds.). 1998. Isotope Trace in Catchment Hydrology, Elsevier Science, Amsterdam, 839p.
- KOHLER, H. C. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 309 – 334.
- Kresic N. Hydrogeology and Groundwater Modeling, Second Edition. CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, New York, London, 807 p. 2007.

- Kuchenbecker, M. & Soares, A.C.P. O Grupo Bambuí na Folha Luz (SE-23-Y-D-V). *GEONOMOS* 18(2): 46 – 52, IGC/UFMG. 2010.
- Kuchenbecker, M.; Reis, H.L.S.; Fragoso, D.G.C. Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do cráton do São Francisco. *Revista Geonômos*, 19(2), 42-49. 2011.
- Lagoeiro, L.E., 1990. Estudo da deformação nas sequências carbonáticas do Grupo Una na região de Irecê-BA. Dissertação de Mestrado em Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. 105p.
- LATRUBESSE, E. M., STEVAUX, J.C., SANTOS, M.L. dos. ASSINE, M.L. 2005. Grandes sistemas fluviais: geologia, geomorfologia e paleoidrologia. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. dos S.; OLIVEIRA, P. E. Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, 2005. cap. 13, p. 276 -297.
- Lepsch, Igo F. Formação e conservação dos solos. 2ª Edição. Editora Oficina de textos. 216 págs. 2010.
- Lepsch, Igor F. Formação e conservação dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 1ª reimpressão. 2005.
- Lyne, V. D. and Hollick, M. 1979., Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. *Hydro. And Water Resour. Symp.* Institution of Engineers Australia, Perth.
- Luz, J. A. G.; Leal, L. R. B.; Barreto, F. S. Tratamento estatístico dos dados dos poços da região do platô de Irecê-Bahia. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas XIII, Anais, p.45-56. 2004.
- Maia, P. H. P.; Dias Neto, B.; Correia-Gomes, L. C. Análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências no carste de Lapão. *Cadernos de Geociências*, v. 7, n.2, 2010.
- MALDANER, C.H. 2010. Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP). Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- 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.
- Marinho, J.M.L. Reconhecimento geofísico da Região de Irecê - Bahia. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica da UFBA. 1977.
- MCNUTT, R.H. 2000. Strontium isotopes. In: Cook, P.G., Herczeg, A.L. (Eds.). *Environmental traces in Subsurface Hydrology*. Kluwer Academic Publishers, pp.234-260.
- MARTINS, V. 2008. Aplicação de Isótopos de Pb, Sr, H e O como traçadores de recarga e da contaminação de aquíferos metropolitanos: um exemplo da Bacia do Alto Tietê. São Paulo, 220p. Tese doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- Ministério do Meio Ambiente – MMA, 1995. Secretaria de Recursos Hídricos - SRH. Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Verde e Jacaré.
- Ministério do Meio Ambiente – MMA, 1995. Diagnóstico do macrozoneamento
- Misi, A. & Souto, P. Controle Estratigráfico das Mineralizações de Chumbo, Zinco, Flúor e Bário no Grupo Bambuí – Parte Leste da Chapada de Irecê (Bahia). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 5(1):30-45. 1975.
- Misi, A. Estratigrafia Isotópica das sequências do Supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do cráton do São Francisco. Idade e correlações. In: Pinto, C. P. e Martins-Neto (Org.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos minerais*. Belo Horizonte: SBG/MG. p. 67-92. 2001.
- Misi, A. O Grupo Bambuí no estado da Bahia. In: H.A.V. Inda (ed.) *Geologia e recursos minerais do estado da Bahia: Textos básicos*. Salvador, CPM, v.1, p. 119-154. 1979.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Brasil. Diagnóstico do Macrozoneamento Ecológico Econômico da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília: 2011.
- Nossa, T.C.B. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Tese de doutoramento apresentada ao IG/UFBA, Salvador/BA. 2011.
- Nossa, T.C.B.; da Luz, J.A.G. Avaliação Preliminar da Qualidade das Águas nos Municípios de Irecê e Lapão-BA. In: XV Congresso Brasileiro de Geologia, Natal/RN. 2008.
- NOSSA, T.C.B.; SILVA, H. M.; LEAL, L.R.B., 2009. A influência do sistema de fraturamentos no regime de fluxo em aquíferos cársticos: um estudo de caso nos municípios de Irecê e Lapão – BA. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande.
- Oliveira Filho & Bispo, I., 2015. Carta geotécnica de aptidão à urbanização em ambiente cárstico – Lapão-BA. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia. 118p.
- Oliveira, A.I. & Leonardos, O.H. *Geologia do Brasil*. Com. Bras. Centenários. Portugal. 1940.
- Oliveira, C.N.N. (s/ data). Utilização das Águas Subterrâneas para Irrigação na Região de Irecê. UEFS/Bahia. Disponível em: <http://www.Geoambiente.ufba.br/>. Acesso em 10 de março de 2016.
- Oliveira, P. *et al* Paleovegetação e Paleoclimas do Quaternário do Brasil. In: Souza, C.R.G. *et al* (editores) *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto, Holos Editora, pp. 52-74. 2005.
- OLIVEIRA, P.E.; BEHLING, H.; LEDRU M.P.; BARBERI, M.; BUSH, M.; SALGADO-LABOURIAU, M.L.; GARCIA, M.J.; MEDEANIC, S.; BARTH, O. M.; ASSUMPÇÃO, M.A.B.; YBERT, R.S. 2005. Paleovegetação e Paleoclimas do Quaternário do Brasil. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. de. *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2005. cap. 13, pp. 52-74.

- Palmer, A. N. *Cave Geology*. 2ª ed. Kansas: Allen Press. 2009. 454p.
- Pedreira da Silva, A.J.C.L. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de doutoramento apresentada ao IG/USP, São Paulo. 1994.
- Pedreira, A.J. & Mascarenhas, J.F. A Sequencia Estratigráfica da Chapada Diamantina NE, Bahia, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia 28, Anais. Porto Alegre, SBG, v.4.p.19-26. 1974.
- Pedreira, A.J.; Souza, S.L.; Brito, P.C.R.; Silva, R.W.S., 1993. Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 2, Salvador.
- Pedreira, A.J.; Filho, V.M.C.; Monteiro, M.D.; Carvalho, M.P.; Souza, W.S.T. Geologia e potencialidade para mineralizações de cobre, chumbo, zinco e prata da borda norte da Chapada Diamantina, Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 1, Salvador. 1993.
- Pedreira, A.J.; Souza, S.L.; Brito, P.C.R.; Silva, R.W.S. Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 2, Salvador. 1993.
- Penha, A.E.P.P. O Calcário Caatinga de Orolândia, Bahia: Feições Diagnósticas, Gênese e Evolução de um Perfil Calcrete. Tese de Mestrado, Universidade Federal da Bahia. 1994.
- Pessoa, F.P., 2005. Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 575 p.
- Pinto, C. P. e Martins-Neto (Org.). Bacia do São Francisco: geologia e recursos minérios. Belo Horizonte: SBG/MG. p. 67-92. 2001.
- Piper, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Transactions American Geophysical Union 25: 914 – 923.
- Pomerol, Charles; Lagabrielle, Yves; Renard, Maurice; Guillot, Stephane. Princípios de geologia, técnicas, modelos e teorias. 14ª Edição. Editora Bookman Companhia, 1052 págs. 2012.
- Porto Lira, H.M. O Efeito Elétrico das Argilas nos Arenitos - Contribuição ao estudo da correlação resistência transversal x transmissividade hidráulica. Dissertação de mestrado apresentada à UFPE. 2001.
- Ramos, S. O. Variações sazonais dos níveis hidrostáticos do aquífero cárstico da região de Irecê, Bahia: Implicações para estimativa da recarga. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 137 p. 2005.
- Ramos, S.O.; Araújo, H.A.; Leal, L.B.L.; Luz, J.A.G.; Dutton, A.R. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterrâneas no semiárido. Revista Brasileira de Geociências 37(4 - suplemento): 227-233. 2007.

- Reis, H.L.S.; Gomes, C.J.S.; Fragoso, D.G.C.; Kuchenbecker, M., 2013. O cinturão epidérmico de antepaís da Bacia de Irecê, Cráton do São Francisco: principais elementos estruturais e modelagem física analógica. *Geologia USP (São Paulo)*, v. 13, n.4, p. 125-139.
- Sallun Filho, W., 2009. Subsidência e colapso em terrenos cársticos. *In: Tominaga, L.K.; Santoro, J.; Amaral, R., 2009. Desastres Naturais – Conhecer para prevenir. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo.*
- Sampaio, A. R. (Org.); Dos Santos, R.A.; Rocha, A.J.D.; Guimarães, J. T., 2001. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Jacobina – Folha SC.24-Y-C. Estado da Bahia. Escala 1:250.000 – Brasília : CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.
- Sampaio, E.S. & Santos, E.S M., 2009. Gravimetria Aplicada à Análise de Risco de Colapso Cárstico na Zona Urbana de Lapão, Bahia, Brasil. Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, IGEO, Universidade Federal da Bahia-UFBA, Salvador.
- Sant'Anna Neto, J. L.; Nery, J. T. Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e seus impactos regionais. *In: C. R. G. Souza, K. Suguio, A.M.S.P. Oliveira, P.E. Oliveira (eds.). Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos Editora. p. 28-51. 2005.*
- Santos, E. S. M.; Silva, R. W.S.; Sampaio, E. E. S.; Silva, E. F. A.; Monteiro, M.D. Análise de risco de colapso cárstico na zona urbana e periurbana de Lapão. 11th International. Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Salvador, Bahia, Brazil, 24-28p. 2009.
- Santos, H.G.; Zaroni, M.J.; e Almeida, E.P.C - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 3 ed. Revisada e ampliada – Brasília, DF. Embrapa 2013.
- Santos, H.G.; Zaroni, M.J.; e Almeida, E.P.C.; SiBCS Embrapa Solos. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0q43a0r58asu5l.html#](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0q43a0r58asu5l.html#)> Acesso em: 02 de setembro de 2015.
- Santos, R. A.; Cruz, M. J. M.; Nascimento, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma estação dos recursos hídricos subterrâneos. *Cadernos de Geociências*, nº 7, p. 54-62. 2010.
- Schobbenhaus Filho, C.; Campos, D.A.; Derze, G.R.; Asmus, H.E. *Geologia do Brasil: Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Minerais. Brasília, DNPM, 501 p. 1984.*
- Schobbenhaus, C. As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santo Onofre, Estado da Bahia: revisão e novas propostas. *Revista Brasileira de Geociências*, 26:265-276. 1996.
- Schobbenhaus, C. Estudo geoeconômico preliminar do depósito de ferro do Rio Peixe Bravo, norte de Minas Gerais. *SUDENE, Recife, 36 p. (Série Geologia Econômica 8). 1972c.*

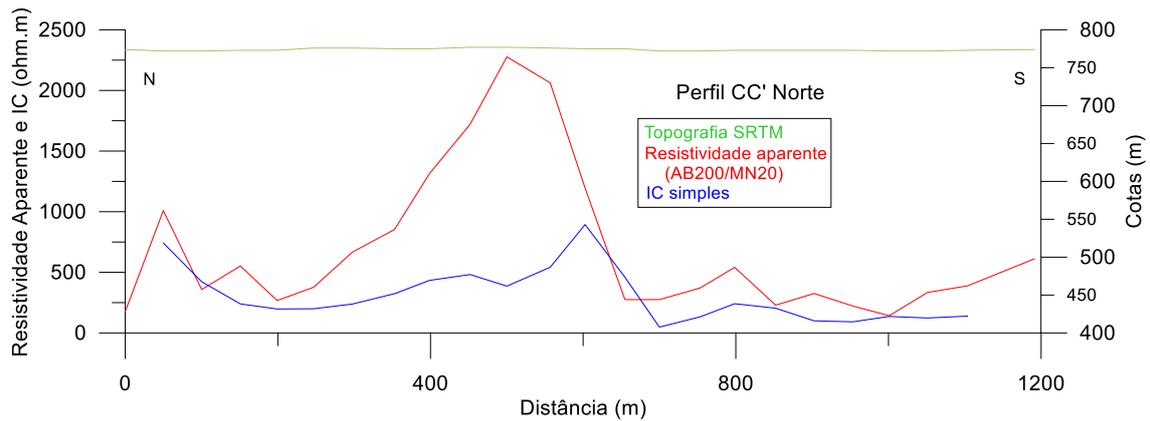
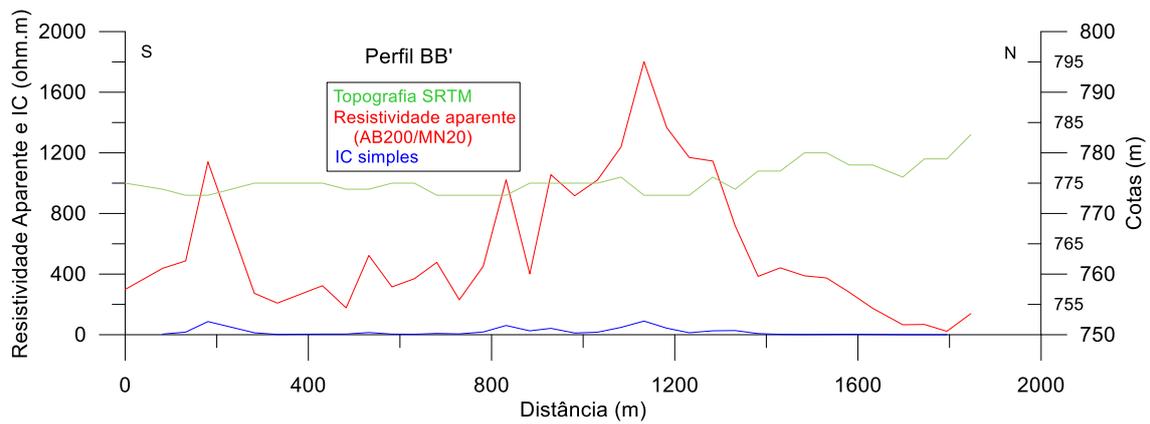
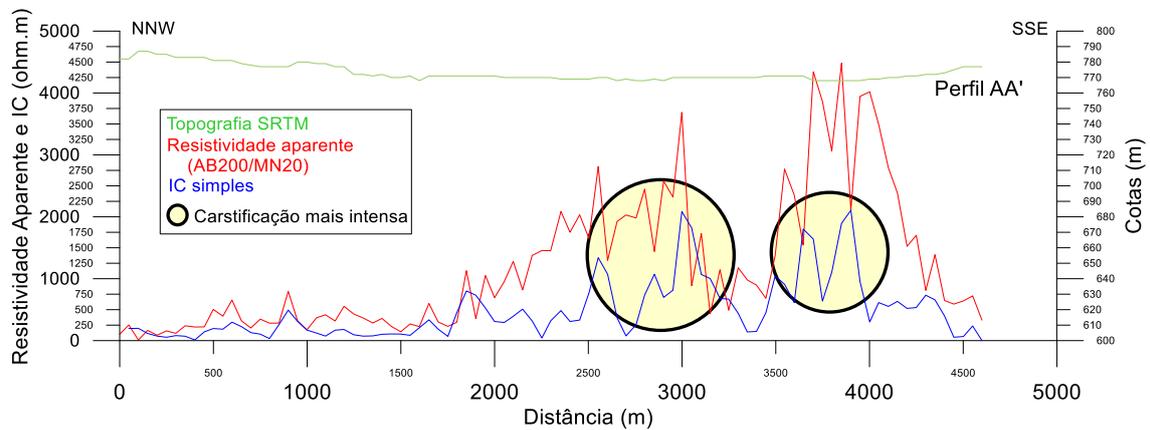
- Schobbenhaus, C. Geologia da Serra do Espinhaço entre Porteirinha e Monte Azul, norte de Minas Gerais. SUDENE, Recife, 19 p. (inédito). 1972b.
- Schobbenhaus, C. Relatório geral sobre a geologia da região setentrional da Serra do Espinhaço-Bahia central. SUDENE, Recife, 112 p. (Série Geologia Regional 19). 1972a.
- Schobbenhaus, C.E. & Kaul. P.F.T. Contribuição à Estratigrafia da Chapada Diamantina – Bahia Central. Min. Met. 53 (315): 116-129. 1971.
- SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 1998. Análise dos atributos climáticos do estado da Bahia. Série Estudos e Pesquisas, 38, 85p.
- Sgarbi, Geraldo Noberto Chaves. Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, 2ª Edição revista e ampliada. UFMG. 632 págs. 2012.
- Silva, A.B. Contribuição à hidrogeologia dos karsts da região da Bahia. Revista de Água Subterrânea, 3: 11-16. 1973.
- Silva, A.B. Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia. CBPM, Série Arquivos Abertos 24, Salvador/BA. 2006.
- Silva, D.G.; Melo R.F.T.; e Corrêa, A.C.B. 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.
- Silva, H.M. Sistema de Informações Geográficas do Aquífero Cárstico da Microrregião de Irecê, Bahia: Subsídio Para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Verde e Jacaré. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Meio Ambiente da UFBA. 2005.
- Silverman, B.W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall. 1986.
- Souza, C.R.D., Suguio, K., Oliveira, A.M.S., Oliveira, P.E. Quaternário do Brasil. Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Holos. Editora Holos. Ribeirão Preto. 2005.
- Souza, J.D.; Melo, R.C.; Kosin, M.; Jesus, J.D.A. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia: Mapa Geológico do Estado da Bahia - Escala 1:1.000.000. Programa Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo e Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Convênio de Cooperação Técnico Científica CBPM-CPRM. 2002.
- Souza, S.L.; Brito, P.C.R.; Silva, R.W.S. Estratigrafia, Sedimentologia e Recursos Minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. Salvador, CBPM, Série Arquivos Abertos 2: 36p. 1993.
- STIFF, H.A. Jr. 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Journal of Petroleum Technology 3 (10):15 - 17.

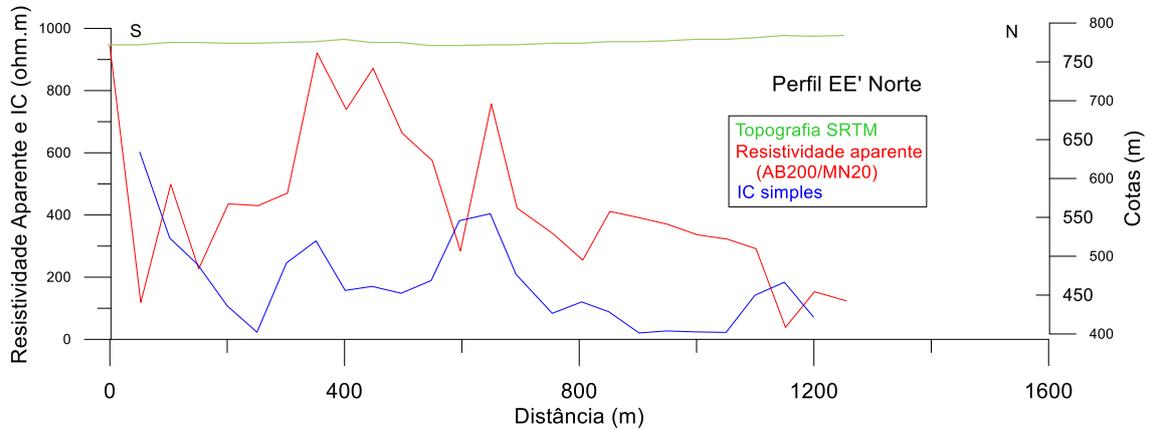
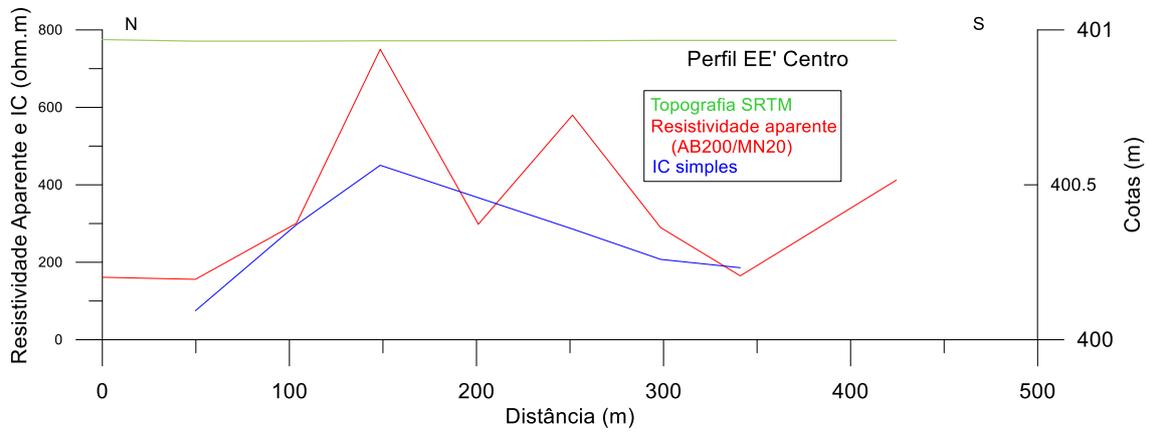
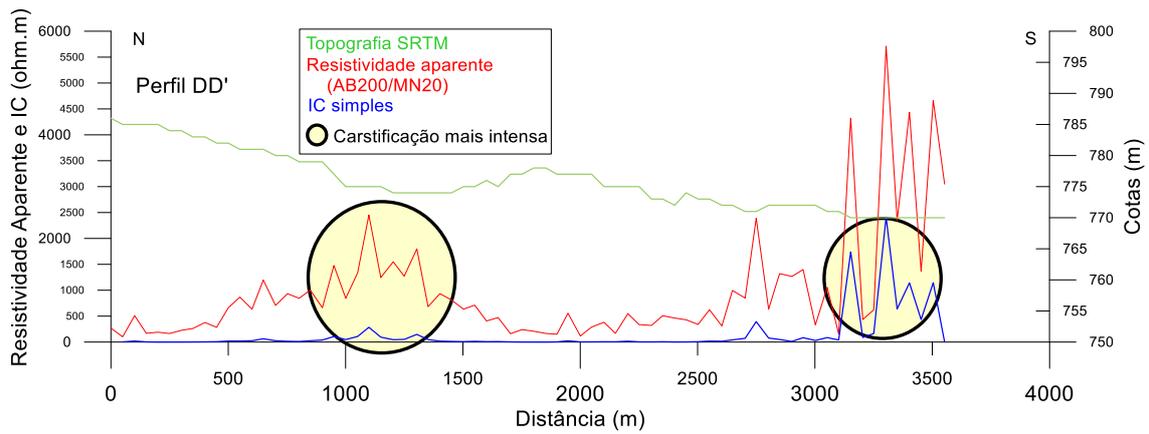
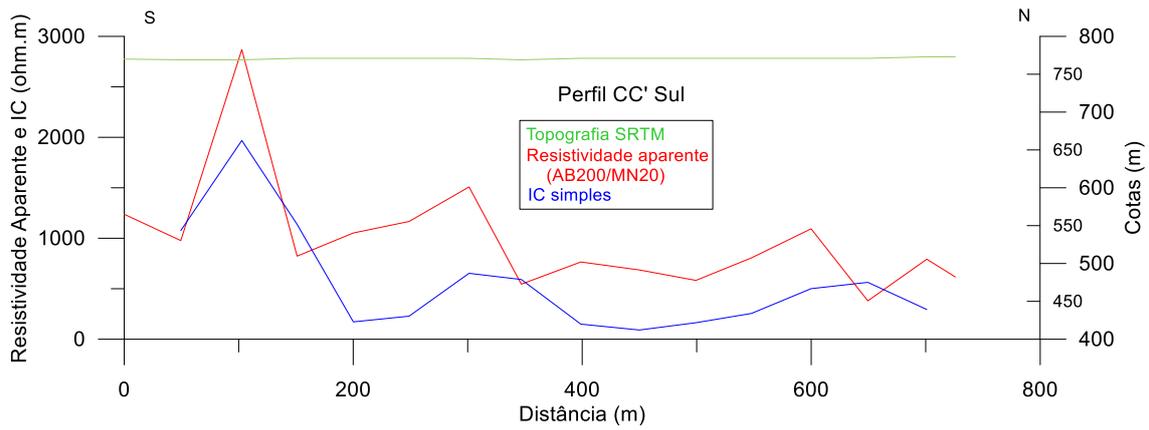
- Streltsova-Adams, T.D. Well hydraulics in heterogeneous aquifer formations. IN: Advances in Hydroscience. Ven Te Chow (ed). 11 (1978). Academic Press. 1978.
- Suguio, K. Geologia do Quaternário e mudanças ambientais. São Paulo: Oficina de textos. 2010.
- Suguio, K. Geologia Sedimentar. 1ª Edição. Editora Blucher, 416 págs. 2003.
- Suguio, K.; Barcelos, J.H.; Matsui, E. Significados paleoclimáticos e paleoambientais das rochas calcárias da Formação Caatinga (BA) e do Grupo Bauru (MG/SP). Anais XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, 1: 607-617. 1980.
- SZIKSZAY, M. (1981) Hidrogeoquímica das fontes de Águas da Prata, Estado de São Paulo: origem, classificação e caracterização. São Paulo, 2v. (Tese de Livre Docência - Instituto de Geociências/USP).
- TERRA, GERSON JOSÉ SALAMONI *ET AL.* 2009, 2010 Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. Boletim de Geociências Petrobras, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p.9-29, nov.2009/maio 2010.
- Thornthwaite, C. W.; Mather, J. R. The water balance. New Jersey: Drexel Institute of Technology. 1955, 104p. In: SEI - Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Análise dos atributos climáticos do estado da Bahia. Série Estudos e Pesquisas, 38, 85p. 1998.
- Villaneuva, T.C.B.; Leal, L.R.B.; Zucchi, M.R.; Azevedo, A.E.G.; Miranda, J.G.V.; Villanueva, P.R., 2014. Avaliação isotópica e hidroquímica do Aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê, Bahia. Águas Subterrâneas (São Paulo) 28(2): 82-94.
- Villanueva, T. C.B.; Leal, L.R.B.; Zucchi, M.R.Z.; Azevedo, E.G.; Villanueva, P.R., 2015. Diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas e elaboração do mapa de uso e ocupação dos solos na região de Irecê-BA. Águas Subterrâneas (São Paulo) (2015), 29 (1): 30-41.
- Waltham, A.C. & Fookes, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. Quarterly Journal Engineering Geology Hydrogeology, 36, 101-118. 2003.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., 2005. Sinkholes and Subsidence – Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK.
- White W.B., 1984. Rate process: chemical kinetics in the development of karst aquifers. In: LaFleur, R.G. (ed.) Groundwater as a geomorphologic agent. Boston, Allen & Unwin, p. 227-248.
- White, W.B., 1988. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains, 464 p. Oxford University Press: New York.
- Williams, P.W., 1985. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. Zeitschrift Geomorphologie, 29, 463-482.

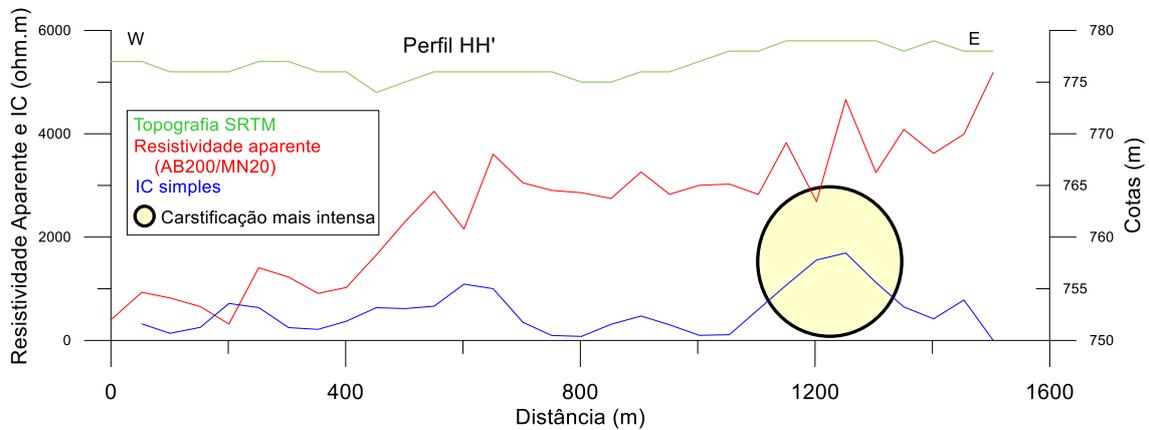
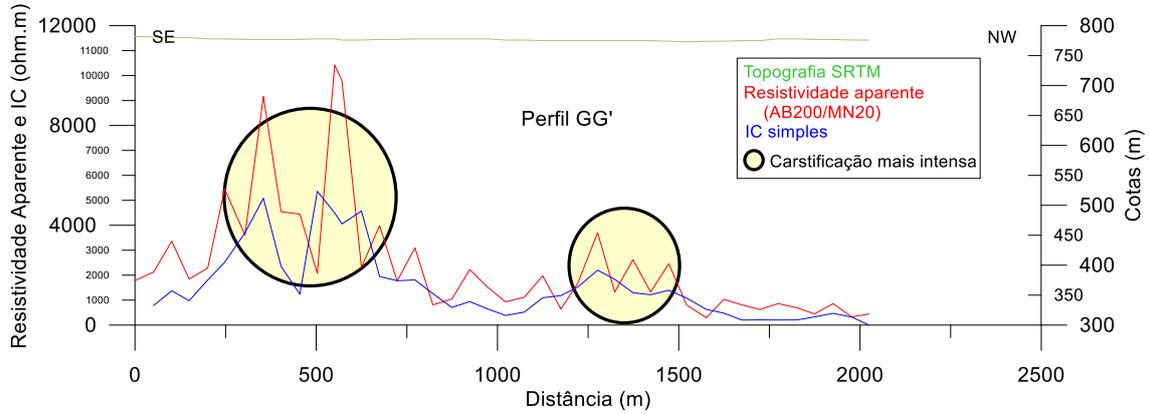
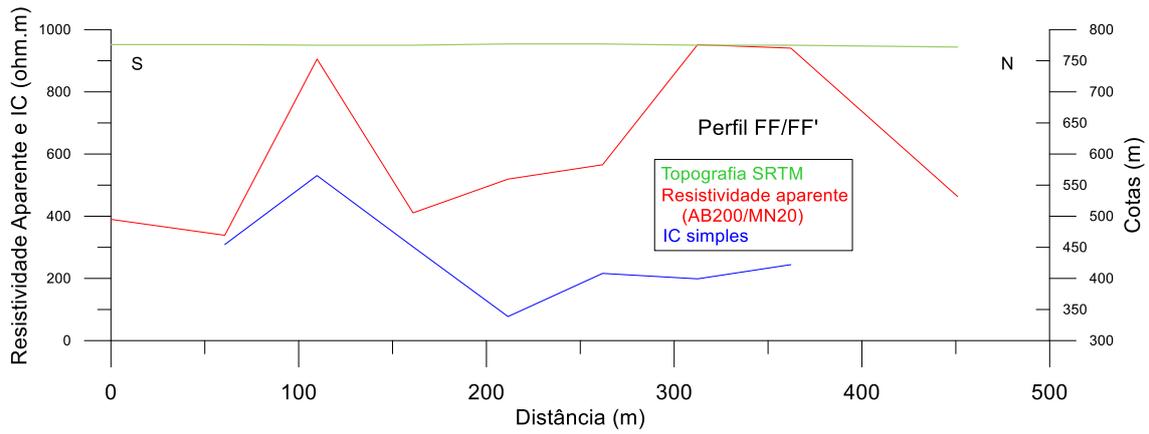
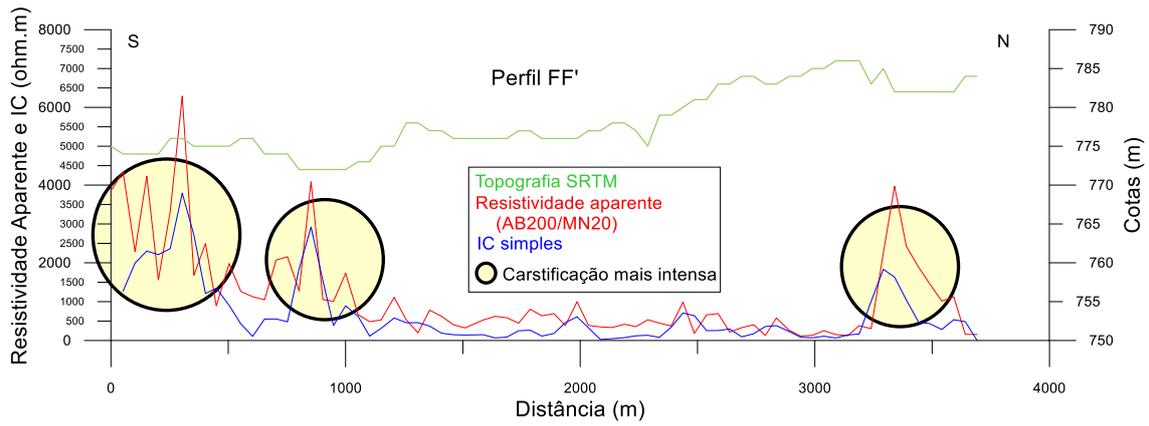
## ANEXO 1

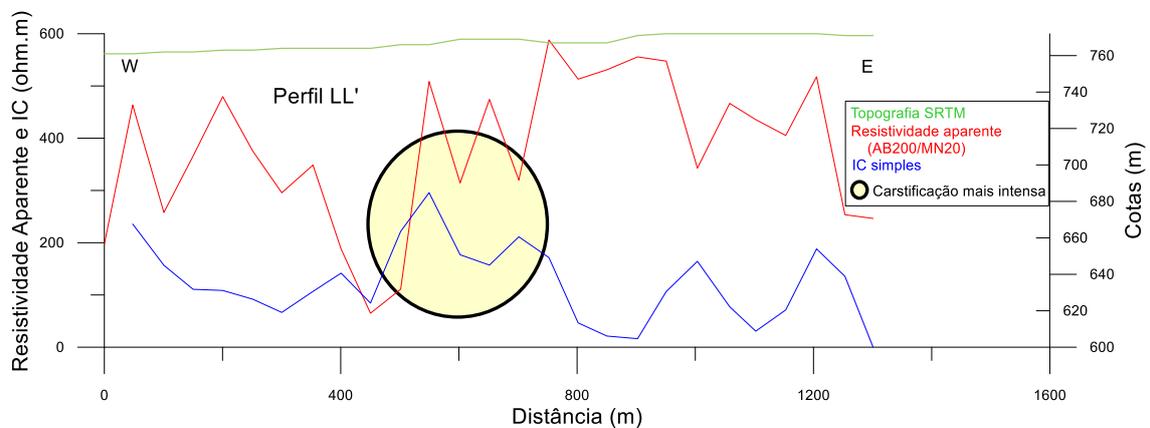
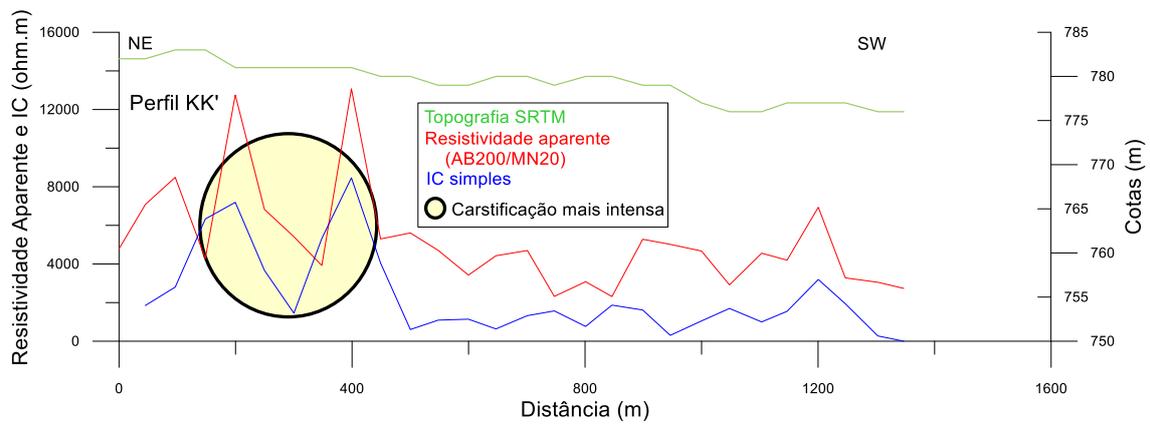
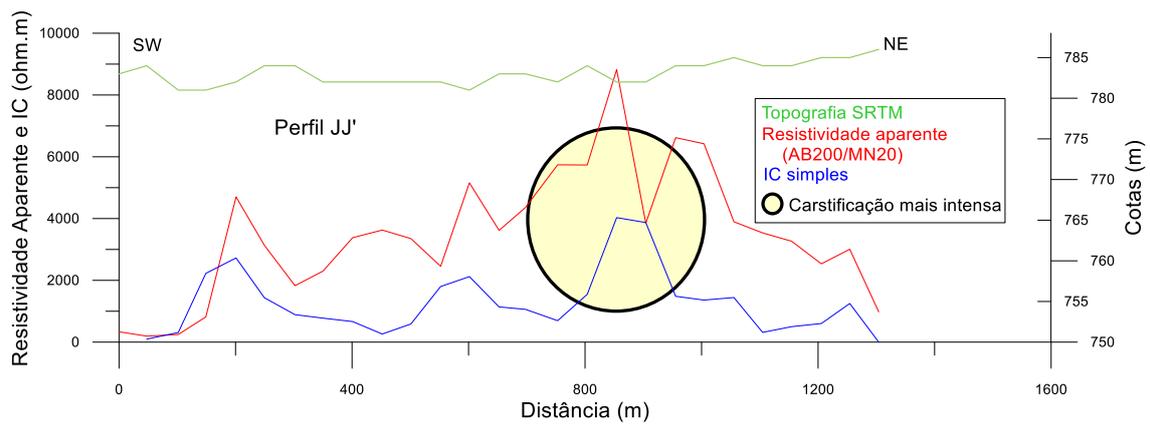
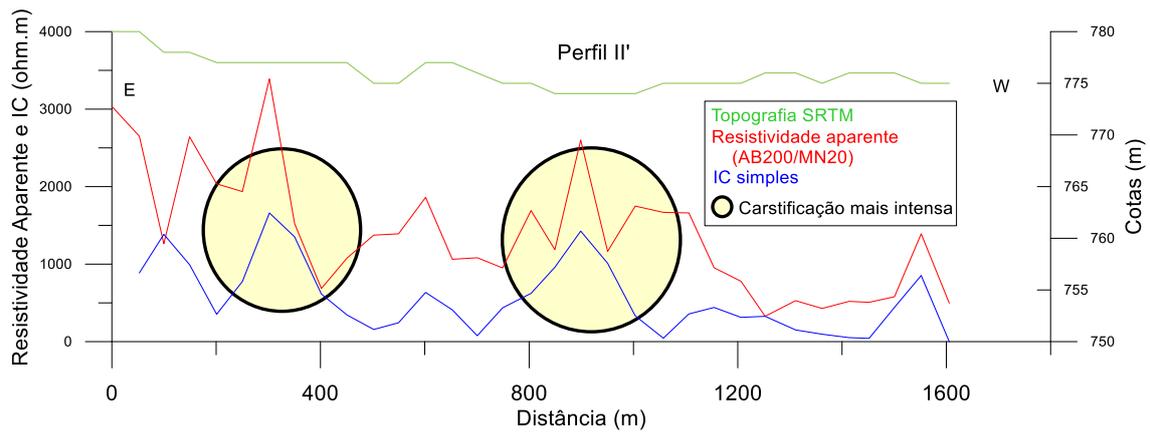
### Perfis de resistividade realizados em Lapão

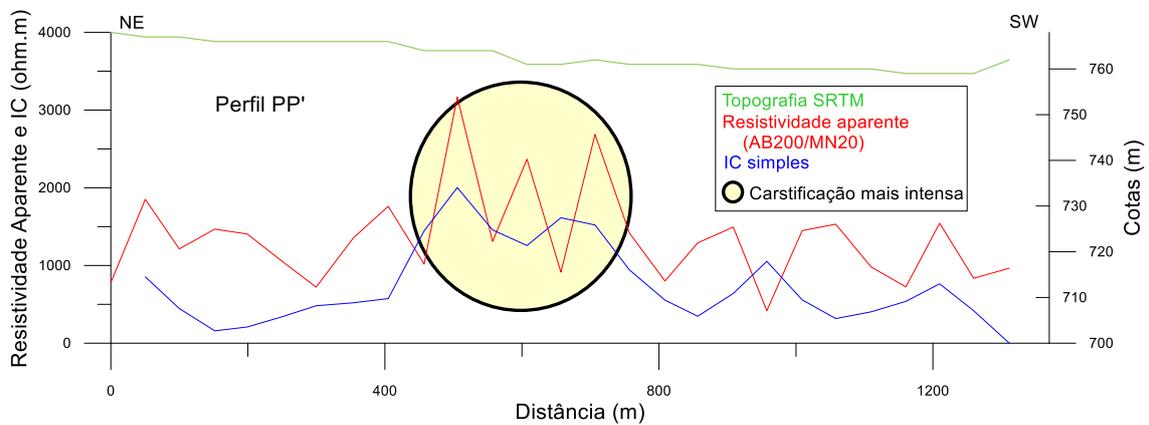
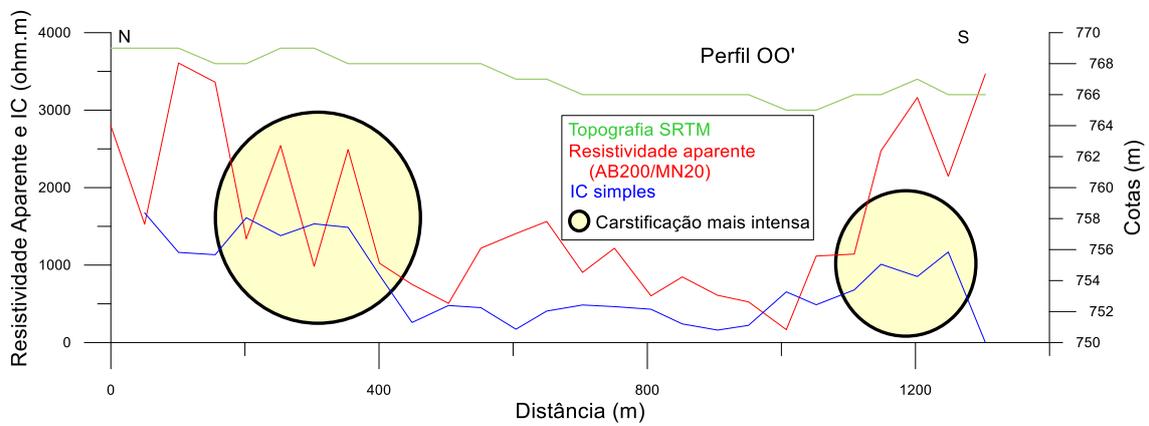
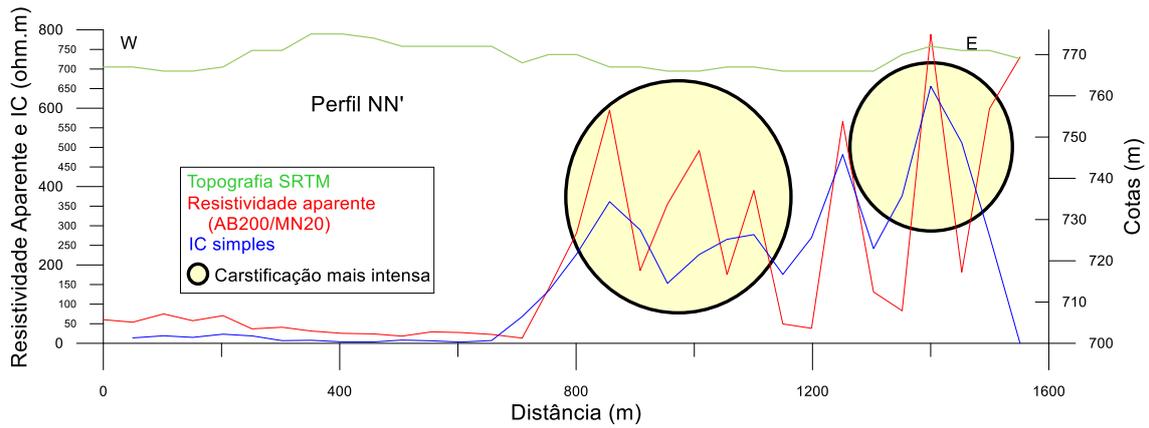
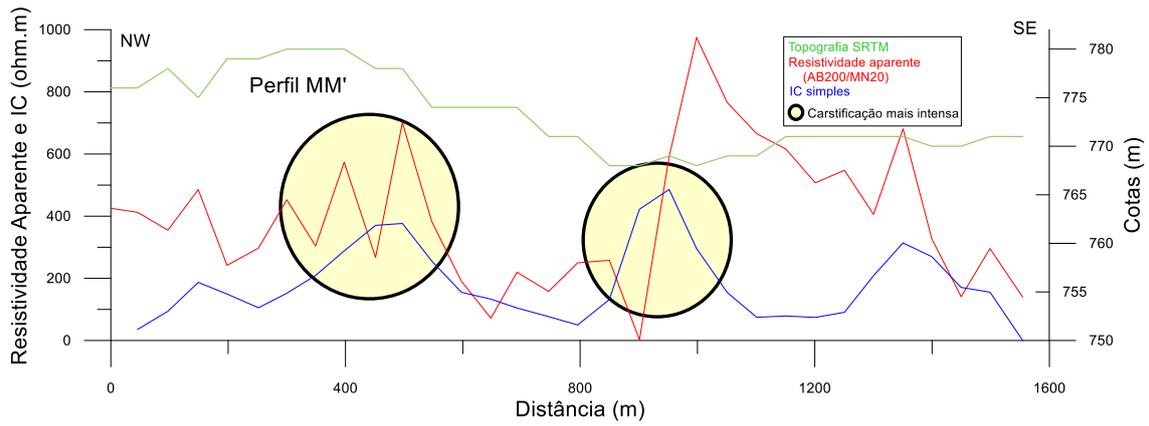
Os perfis de resistividade realizados são identificados por letras atribuídas às suas extremidades, São mostrados a seguir todos os perfis realizados.

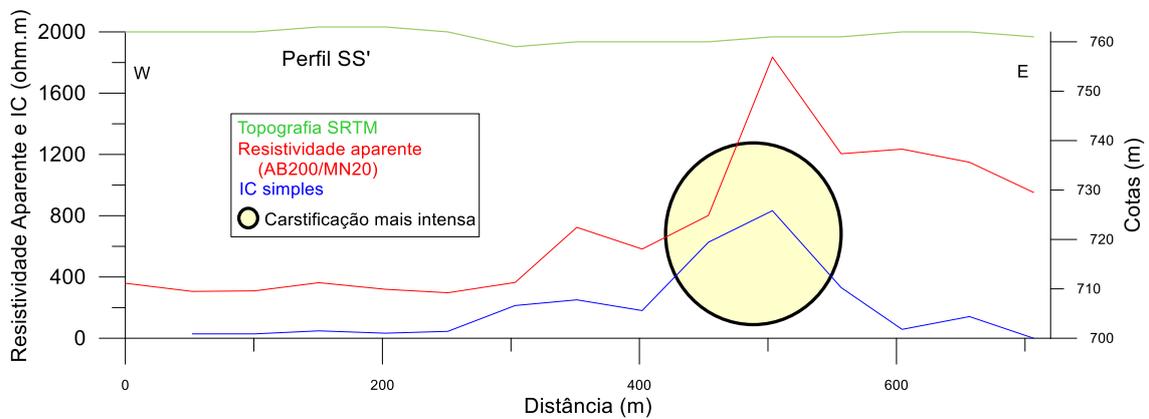
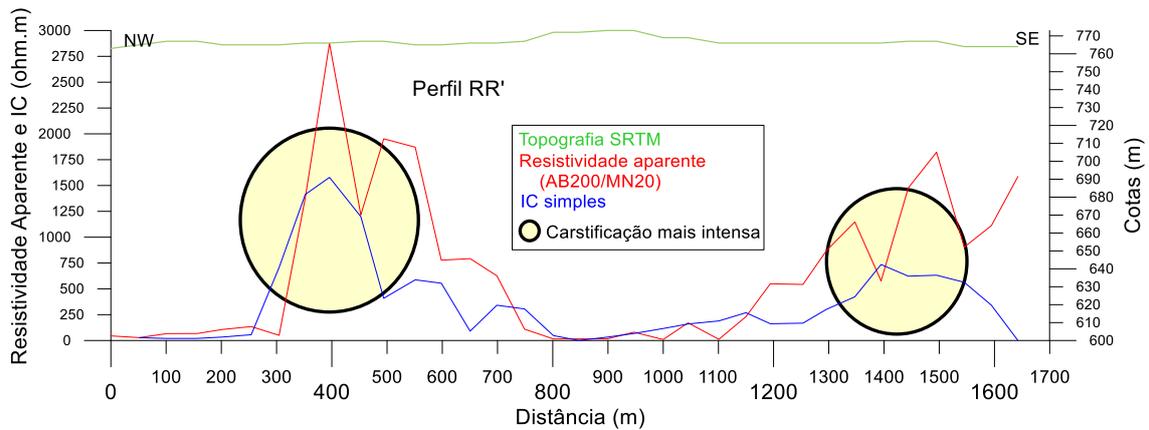
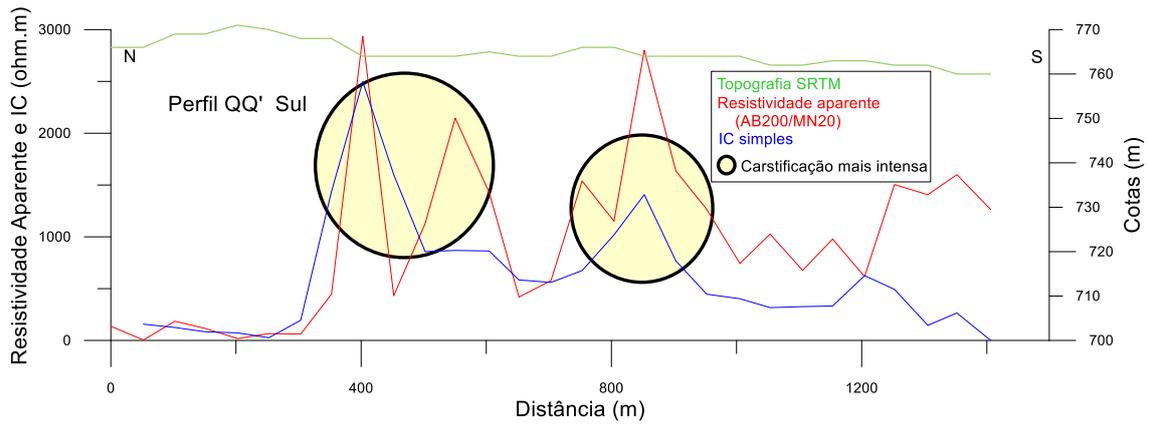
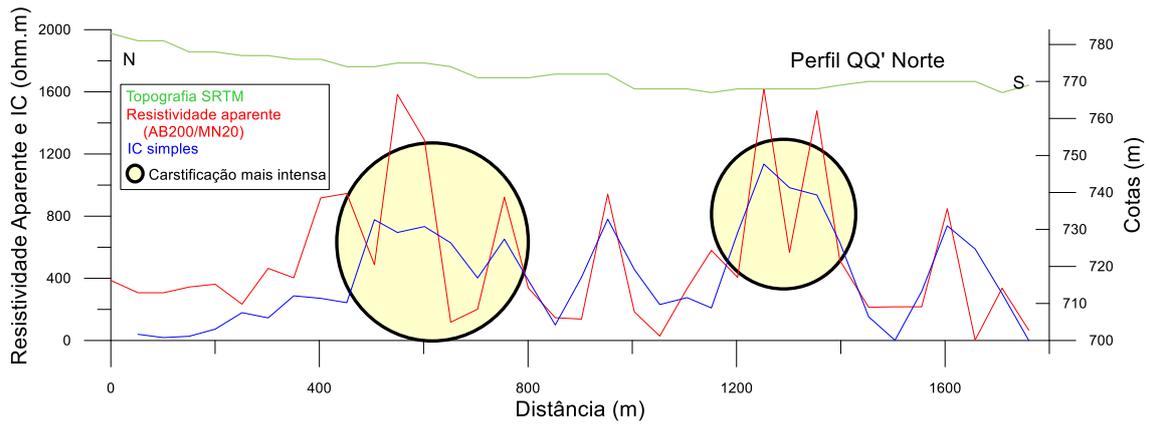


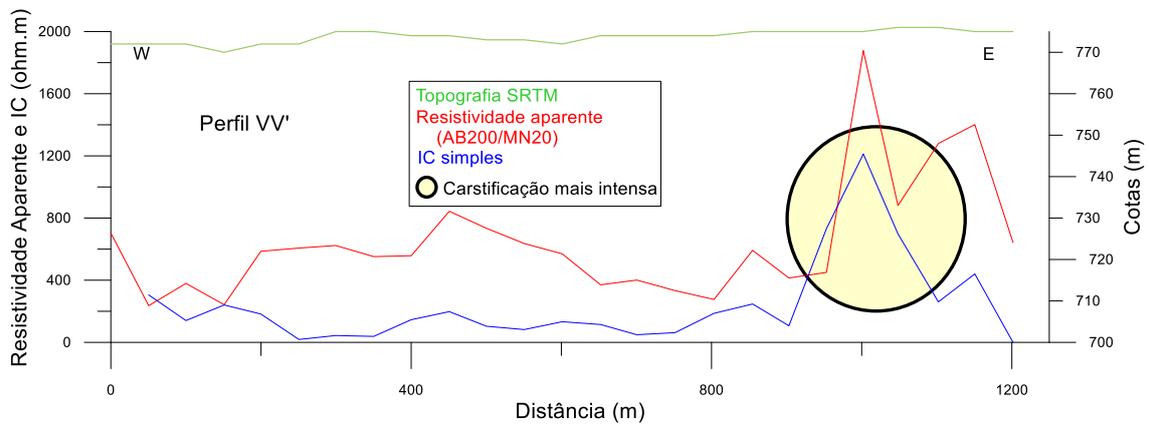
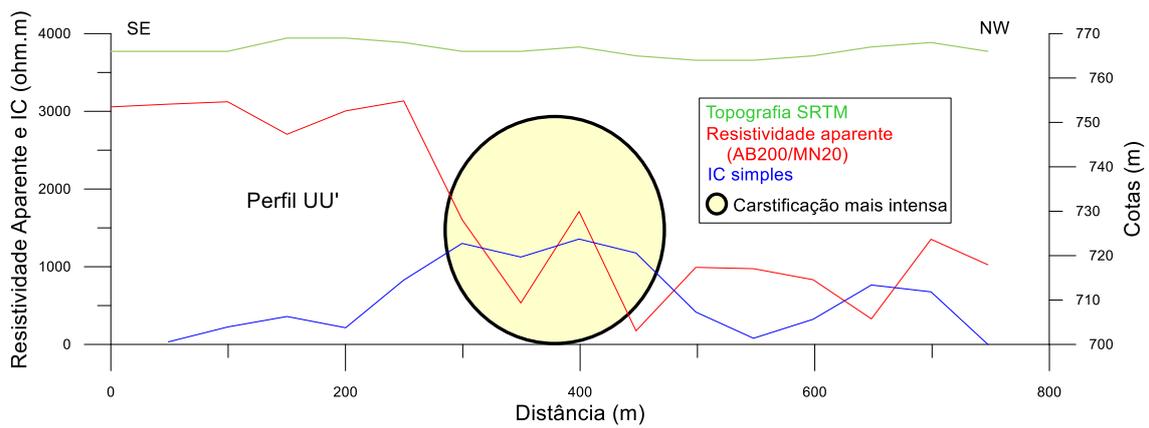
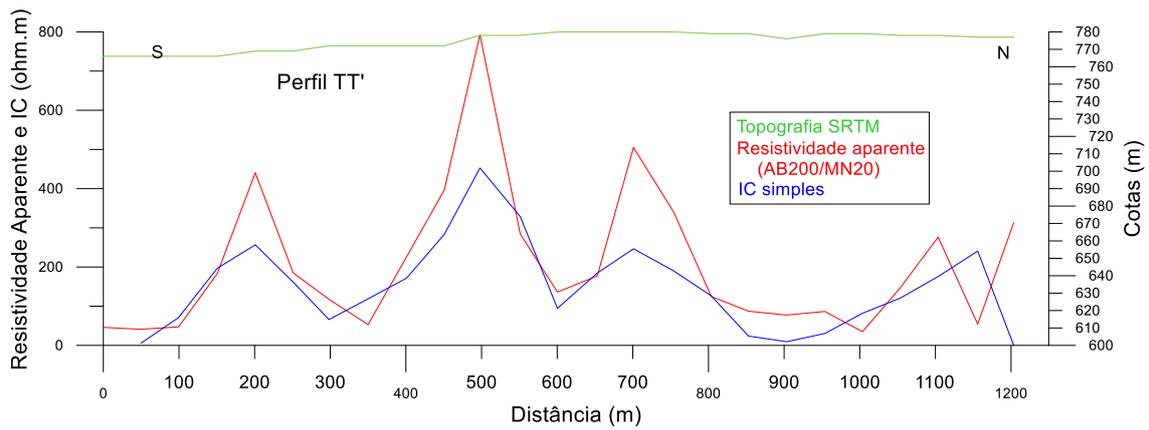














**MINISTÉRIO DO  
MEIO AMBIENTE**

**GOVERNO  
FEDERAL**

