

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS E DE VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

PROPOSIÇÃO DE MODELO DE GESTÃO
INTEGRADA E COMPARTILHADA

RELATÓRIO FINAL

**VOLUME 2 | HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS
URUCUIA E AREADO**

CON S Ó R C I O



República Federativa do Brasil

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

Ministério do Meio Ambiente

Sarney Filho

Ministro

Agência Nacional de Águas**Diretoria Colegiada**

Vicente Andreu (Diretor-Presidente)

Ricardo Medeiros de Andrade

João Gilberto Lotufo Conejo

Gisela Damm Forattini

Ney Maranhão

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Tibério Magalhães Pinheiro

Victor Alexandre Bittencourt Sucupira

Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB

Fernando Roberto de Oliveira

Márcia Tereza Pantoja Gaspar (Gestora do Contrato)

Leonardo de Almeida (Gestor Substituto)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

**Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema
Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão
Integrada e Compartilhada**

RELATÓRIO FINAL

***VOLUME 2 - HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS
AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO***

© 2017 Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L e M
CEP: 70610-200, Brasília - DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Capa:

Local da Foto: Cachoeira do Registro, Taguatinga (TO), Rio Sobrado, com vista da Serra Geral de Goiás (Grupo Urucuia)
Fotografia – Wilton Rocha

Equipe:

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF:

Márcia Tereza Pantoja Gaspar (ANA)	Leonardo de Almeida (ANA)	
José Jânio de Castro Lima (SEMA-MA)	Zoltan Romero C. Rodrigues (SEMA-BA)	Hugo Leonardo T. Soares (SECIMA)
Aldo Araújo de Azevedo (SEMADES-TO)	Eduardo Farias Topázio (INEMA-BA)	Maricene Menezes de O. M. Paixão (IGAM-MG)

Elaboração e Execução – CONSÓRCIO ENGECORPS – WALM:

Marcos Oliveira Godoi – Diretor Técnico do Consórcio
Maria Bernardete Sousa Sender – Coordenação Geral
Daniel Andreas Klein – Apoio à Coordenação
Jacinto Costanzo Junior – Coordenação Setorial

Membros da Equipe Técnica Executora:

Flávio de Paula e Silva – Coordenação Técnica

Alberto Lang Filho	Marcia Regina Stradioto	Walter Sergio de Faria
Rinaldo Moreira Marques	Ualfrido del Carlo Junior	Lígia Monteiro da Silva
Andresa Oliva	Aída M. Pereira Andreazza	Laura Rocha de Castro
Maria Luiza M. Granziera	Elias Hideo Teramoto	Maíra Gimenes
Mirtis Malagutti	Fernando Garcia	Milena Mariano dos Santos
Sibele Lima Dantas	Henrique A. de A. Ramos	Fernanda Machado Martins
Caetano Pontes Costanzo	Lígia de Souza Girnius	Fernando Santos Corrêa
Talita Filomena Silva	Christiane Spörl	

Agradecimentos

Agradecemos aos professores José Eloi Guimarães Campos (UnB), Chang Hung Kiang (UNESP - Rio Claro) e Francisco Manoel Wohnrath Tognoli (UNISINOS) pela colaboração nas discussões técnicas no âmbito destes estudos, bem como todos os demais colaboradores e usuários de recursos hídricos que direta ou indiretamente contribuíram com a elaboração deste trabalho.

Todos os direitos reservados.

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

A265m Agência Nacional de Águas (Brasil).
Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada : volume 2 – Hidrogeologia dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado : relatório final / Agência Nacional de Águas ;
Elaboração e Execução: Consórcio Engecorps - Walm. -- Brasília : ANA, 2017.

138 p. il.

Vol. 2

3 v.

1. Hidrogeologia. 2. Água Subterrânea. 3. Aquífero Urucuia.
I. Consórcio Engecorps II. Título

CDU 556.33

APRESENTAÇÃO

O **Relatório Final** dos *Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada* apresenta os resultados dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do Contrato nº 015/ANA/2011, adjudicado pela Agência Nacional de Águas – ANA – ao Consórcio ENGECORPS♦WALM, em maio de 2011.

Trata da consolidação dos estudos realizados, apresentados nos nove Relatórios Parciais, além de algumas notas técnicas elaboradas sobre temas específicos, definidos pelos Termos de Referência, este elaborado em conjunto pela Agência Nacional de Águas e os seis estados abrangidos pelo Sistema Aquífero Urucuia (SAU) (**Bahia, Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Piauí e Maranhão**), os quais orientaram o desenvolvimento dos trabalhos.

Os estudos realizados contemplaram a execução de cinco grandes etapas metodológicas - com conteúdo descrito resumidamente a seguir - na área de 142.061 Km² apresentada nos termos de referência, considerada naquele documento orientador como o Sistema Aquífero Urucuia-Areado, que abrangia as áreas correspondentes às rochas dos Grupos Urucuia e Areado, incluindo territórios dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins, Maranhão e Piauí. Com o desenvolvimento dos estudos foram reconsiderados os limites, de tal forma que a área total passou a ter 149.077 Km², e propôs-se dividir as unidades em Sistema Aquífero Urucuia (SAU) e Sistema Aquífero Areado (SAA) com embasamento técnico, onde este último termo será apresentado de forma inédita a partir deste momento (Figura 1).

- ✓ **Etapa I - Mobilização e Consolidação do Plano de Trabalho:** dedicada à realização de atividades necessárias para dar início aos trabalhos e à coleta de dados disponíveis sobre o SAU e o SAA, além de reunião para apresentação da equipe, definição de diretrizes e procedimentos para desenvolvimento dos trabalhos;
- ✓ **Etapa II - Estado da Arte: Hidrogeologia, Geomorfologia, Geologia, Hidrologia, Hidrogeoquímica e Uso e Ocupação do Solo:** realização de um amplo levantamento de dados secundários, visando à obtenção do estado da arte dos aspectos de interesse à caracterização dos aquíferos Urucuia e Areado, a saber: hidrogeologia, geomorfologia, geologia, hidrologia, hidrogeoquímica e uso e ocupação do solo;
- ✓ **Etapa III - Levantamento Geológico, Geomorfológico, de Solo, de Vegetação, Hidrológico, de Uso e Ocupação do Solo, de Ensaio de Infiltração, de Dimensões e Condições de Contorno dos Aquíferos e Levantamento Hidrogeológico:** realização dos levantamentos de campo programados com base nas fases antecedentes (Etapas I e II);
- ✓ **Etapa IV - Avaliação Hidrogeológica e Avaliações de Ocupação e Uso do Solo, Hidrogeoquímica, Vulnerabilidade e Riscos de Contaminação do SAU:** contemplou 12 atividades, com o objetivo de realizar a interpretação dos resultados dos levantamentos de campo obtidos na Etapa III, à luz da bibliografia disponível; e

- ✓ **Etapa V - Estratégias de Manejo Sustentável das Águas Subterrâneas dos Sistemas Aquíferos Urucuia (SAU) e Areado (SAA):** constituiu a consolidação do trabalho, consubstanciada na elaboração de uma base de dados em ambiente SIG para consulta às informações geradas de modo a subsidiar a proposta do plano de gestão integrada e compartilhada dos aquíferos entre os Estados.

Esses estudos foram acompanhados por uma comissão (Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF) de técnicos, representantes indicados pelos estados abrangidos pelos Sistemas Aquíferos. A Comissão procedeu o acompanhamento e avaliação de todas as fases dos estudos, juntamente com representantes da Agência Nacional de Águas.

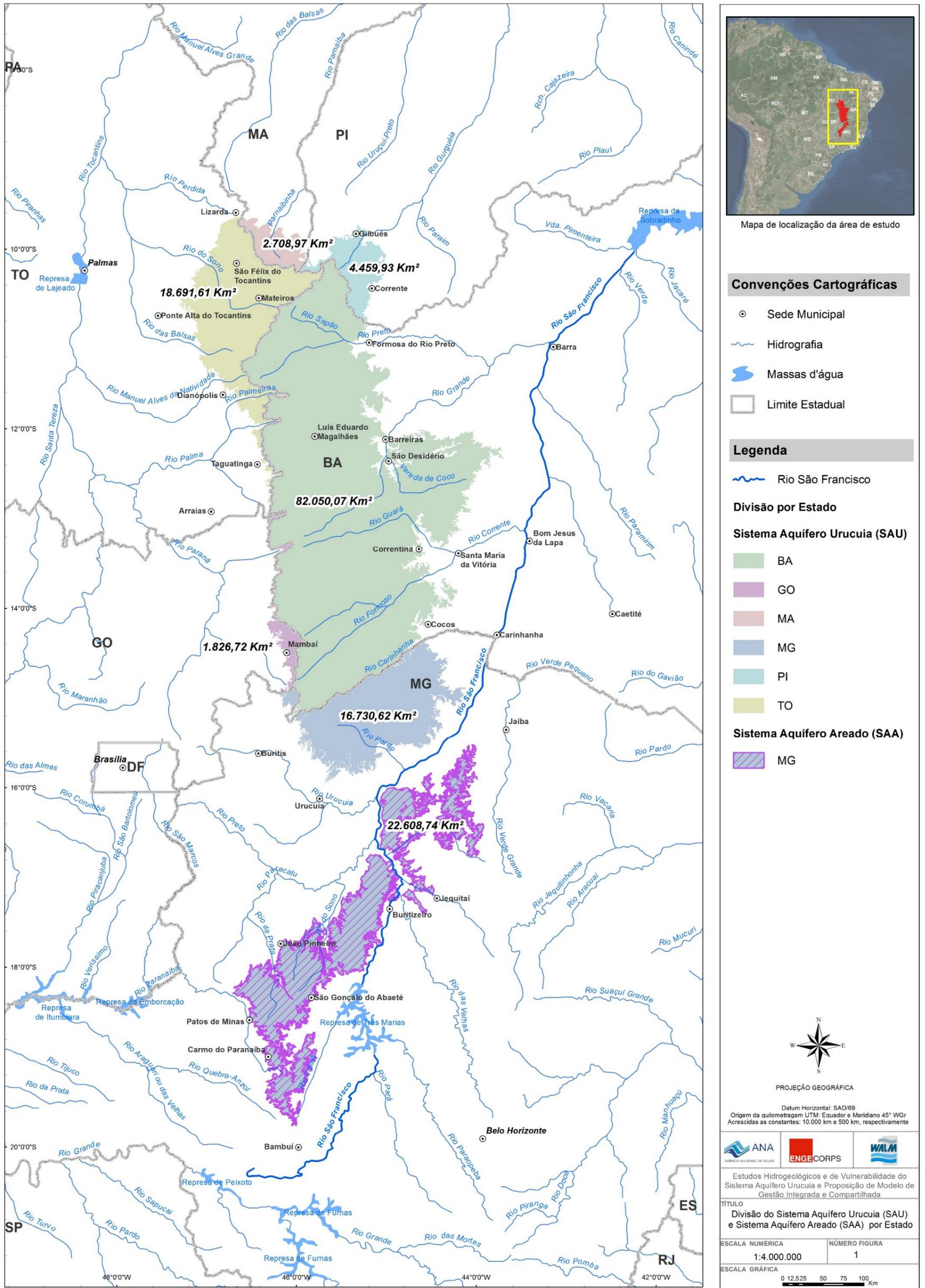


Figura 1 – Divisão do SAU e SAA por Estado.

No presente **Relatório Final** apresenta-se a consolidação dos estudos, estruturado em 13 capítulos, e apresentado em três volumes, sendo o primeiro deles subdividido em dois Tomos. Este produto final inclui ainda o Resumo Executivo, Relatórios Temáticos (Hidrologia, Hidrogeoquímica, Geofísica e Infiltração), e ainda um banco de dados (SIGSAU), o qual consiste no sistema de informações geográficas dos estudos que reúne mapas, relatórios, planilhas e toda a base de dados dos estudos.

O Relatório Final está estruturado conforme descrito a seguir:

VOLUME 1 – DIAGNÓSTICO DO MEIO FÍSICO DA REGIÃO DE ABRANGÊNCIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO

Tomo I: CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO, DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA, LEVANTAMENTO HIDROGEOLÓGICO E INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Preparação de Bases Cartográficas e Interpretação de Imagens de Satélite

Capítulo 3 - Caracterização Geológica, Geomorfológica, Tectônica, Pedológica e de Usos da Terra e Cobertura Vegetal e Ensaio de Infiltração

Capítulo 4 - Levantamento Hidrogeológico

Capítulo 5 - Investigações Geofísicas

Tomo II: CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E HIDROLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO

Capítulo 6 - Estudos Climatológicos e Avaliação Hidrológica

VOLUME 2 – HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO

Capítulo 7 - Avaliação Hidrogeológica dos Sistemas Aquíferos Urucua e Areado

Capítulo 8 - Hidrogeoquímica, Vulnerabilidade e Riscos de Contaminação

VOLUME 3 – ESTRATÉGIAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL DOS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO E CONCLUSÕES

Capítulo 9 - Estratégias de Manejo Sustentável dos Sistemas Aquíferos Urucua e Areado

Capítulo 10 - Proposta de Plano de Gestão Integrada e Compartilhada do Sistema Aquífero Urucua

Capítulo 11 - Proposta de Plano de Gestão Integrada do Sistema Aquífero Areado

Capítulo 12 - Considerações Finais e Recomendações sobre a Gestão de Recursos Hídricos

Capítulo 13 - Resumo e Conclusões Finais

Ao final de cada volume, estão listadas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto ou utilizadas para consulta.

O presente caderno constitui o **Volume 2** do Relatório Final que inclui os **capítulos 7 e 8**.

SUMÁRIO DE FIGURAS

VOLUME 2

	PÁG.
FIGURA 7.1 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DO SAU E DO SAA.....	13
FIGURA 7.2 - MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) DO SAU E SEÇÃO ALTIMÉTRICA A-B.	17
FIGURA 7.3 - MAPA DE ESPESSURA DO SAU	18
FIGURA 7.4 - MAPA POTENCIOMÉTRICO DO SAU.	20
FIGURA 7.5 – DETALHE DAS ÁREAS SUBTERRÂNEAS (SAU) E POSTOS FLUVIOMÉTRICOS PRINCIPAIS.....	22
FIGURA 7.6 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS TERMOS DA EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO.	23
FIGURA 7.7 - VARIAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE NAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS AVALIADAS ASSOCIADA À VARIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS MAIS PRÓXIMAS.....	26
FIGURA 7.8 - ÁREAS DE RECARGA E DESCARGA DO SISTEMA AQUIFERO URUCUIA.....	29
FIGURA 7.10 - PARÂMETROS UTILIZADOS NO CÁLCULO DE RESERVAS RENOVÁVEIS E PERMANENTES DE AQUIFEROS SEDIMENTARES LIVRES.....	31
FIGURA 7.11 - MAPA DE CONTORNO ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO DO SAU.....	33
FIGURA 7.12 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESPESSURAS SATURADAS DO SAU.....	34
FIGURA 7.13 - MAPA DE POTENCIALIDADES (VAZÕES EXPLOTÁVEIS) DO SAU.	40
FIGURA 7.14 - EXEMPLOS DE CONDIÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA ESPECIFICADA (PRIMEIRO TIPO)	41
FIGURA 7.15 - EXEMPLOS DE CONDIÇÃO DE FLUXO ESPECIFICADO (TIPO II OU NEUMANN).....	42
FIGURA 7.16 - CONDIÇÃO DE CONTORNO DE FLUXO DEPENDENTE (TIPO III OU CAUCHY)	43
FIGURA 7.17 - (ESQUERDA) GRID COM NÓ NÃO CENTRADO, CASO EM QUE OS NÓS SE ENCONTRAM NAS INTERSECÇÕES DAS CÉLULAS. (DIREITA) GRID DE NÓ CENTRADO, CASO EM QUE OS NÓS SE POSICIONAM NA PORÇÃO CENTRAL DA CÉLULA (WANG & ANDERSON, 1982)	44
FIGURA 7.18 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA EM SEÇÃO DO MODELO CONCEITUAL CONCEBIDO	46
FIGURA 7.19 - MALHA DE DIFERENÇAS FINITAS DO MODELO	48
FIGURA 7.20 - SEÇÕES COM DIREÇÕES N-S E E-W MOSTRANDO A DISCRETIZAÇÃO VERTICAL DO MODELO EM 2 CAMADAS.	49
FIGURA 7.21 - DISTRIBUIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO.....	50
FIGURA 7.22 - DISTRIBUIÇÃO DAS ZONAS DE BALANÇO HÍDRICO DO MODELO.....	52
FIGURA 7.23- GRÁFICO COM O BALANÇO DE FLUXO PARA O RIO CORRENTE	53
FIGURA 7.24 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE VALORES NORMALIZADOS DE ESCOAMENTO DE BASE REAL E SIMULADO.....	54
FIGURA 7.25 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA CALCULADA PELA SIMULAÇÃO PARA A PRIMEIRA CAMADA.....	56
FIGURA 7.26 - DISTRIBUIÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA CALCULADA PELA SIMULAÇÃO PARA A SEGUNDA CAMADA.....	57
FIGURA 7.27 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA DO SAU PARA A SIMULAÇÃO ENTRE OS ANOS DE 2021 E 2050.	62

FIGURA 7.28 - VARIAÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA PARA A SIMULAÇÃO ENTRE 2021 E 2050 NAS BACIAS DRENADAS PELO SAU.	63
FIGURA 7.29 - PORCENTAGEM DE VARIAÇÃO NO ESCOAMENTO DE BASE PARA A SIMULAÇÃO ENTRE 2021 E 2050 NAS BACIAS DRENADAS PELO SAU.	64
FIGURA 7.30 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA VARIAÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA DO SAU PARA A SIMULAÇÃO ENTRE OS ANOS DE 2051 E 2080.	66
FIGURA 7.31 - VARIAÇÃO DE CARGA HIDRÁULICA PARA A SIMULAÇÃO ENTRE 2051 E 2080 NA PORÇÃO CENTRAL DAS BACIAS DRENADAS PELO SAU.	67
FIGURA 7.32 - PORCENTAGEM DE VARIAÇÃO NO ESCOAMENTO DE BASE PARA A SIMULAÇÃO ENTRE 2051 E 2080 NAS BACIAS DRENADAS PELO SAU.	68
FIGURA 7.33 – UNIDADES GEOLÓGICAS E ÁREA OPERACIONAL DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.....	72
FIGURA 7.34 – RELEVO DISSECADO COM EXPOSIÇÃO DE ROCHAS DO GRUPO AREADO (PRESIDENTE OLEGÁRIO, MG).	73
FIGURA 7.35 – MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.....	74
FIGURA 7.36 – CONTORNO ESTRUTURAL DA BASE DO GRUPO AREADO.	75
FIGURA 7.37 – ESPESURAS TOTAIS (SATURADA E INSATURADA) DAS ROCHAS QUE COMPÕEM O SISTEMA AQUÍFERO AREADO.	76
FIGURA 7.38 – CORRELAÇÃO ENTRE ALTITUDE DO TERRENO E COTA DO NÍVEL DE ÁGUA DE POÇOS E DE SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICIAIS (SEVs) SOBRE O SISTEMA AQUÍFERO AREADO.	78
FIGURA 7.39– MAPA POTENCIOMÉTRICO DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.	79
FIGURA 7.40 – MAPA DE ÁREAS DE RECARGA E DE DESCARGA DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.....	81
FIGURA 7.41 – ESPESURAS SATURADAS DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.	83
FIGURA 7.42 – MAPA DE POTENCIALIDADES (VAZÕES EXPLOTÁVEIS) DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO.....	87
FIGURA 7.43 – MAPA HIDROGEOLÓGICO DO SISTEMA AQUÍFERO AREADO ASSOCIADO A POTENCIALIDADE.	88
FIGURA 8.1 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS - ETAPAS 1 E 2.....	90
FIGURA 8.2 - DIAGRAMAS DE PIPER PARA AMOSTRAS DE ÁGUA DO SAU E SAA - ETAPAS 1 E 2.....	93
FIGURA 8.3 - DISTRIBUIÇÃO DOS DIAGRAMAS DE STIFF PARA AS AMOSTRAS DE ÁGUA DO SAU E SAA - ETAPAS 1 E 2.....	94
FIGURA 8.4 - DETALHE DA DISTRIBUIÇÃO DOS DIAGRAMAS DE STIFF PARA AS AMOSTRAS DO SAU COM CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS MENORES DO QUE 200 μ S/CM - ETAPAS 1 E 2.....	95
FIGURA 8.5 - DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS HIDROQUÍMICOS PARA AMOSTRAS DE ÁGUA DO SAU E SAA, CONFORME DIAGRAMAS DE PIPER - ETAPAS 1 E 2.....	96
FIGURA 8.6 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS HIDROQUÍMICOS, IDENTIFICADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA DO SAU E SAA - ETAPAS 1 E 2.	99
FIGURA 8.7 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DOS SUBGRUPOS HIDROQUÍMICOS DO GRUPO 1, IDENTIFICADOS PELA ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS DE AMOSTRAS LOCALIZADAS NO SAU - ETAPAS 1 E 2.....	100
FIGURA 8.8 - MAPA DE ISOVALORES DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	102
FIGURA 8.9 - MAPA DE ISOVALORES DE PH DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	103
FIGURA 8.10 - MAPA DE ISOVALORES DE ALCALINIDADE (HCO ₃) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	104
FIGURA 8.11 - MAPA DE ISOVALORES DE SÓDIO (NA) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.	107

FIGURA 8.12 - MAPA DE ISOVALORES DE CÁLCIO (CA) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.	108
FIGURA 8.13 - MAPA DE ISOVALORES DE CLORETO (CL) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.	109
FIGURA 8.14 - MAPA DE ISOVALORES DE NITRATO (NO3) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.	110
FIGURA 8.15 - MAPA DE ISOVALORES DE N-NH3 DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	111
FIGURA 8.16 - MAPA DE ISOVALORES DE SULFATO (SO4) DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	112
FIGURA 8.17 - MAPA DE ISOVALORES DO ÍNDICE DE TROCA DE BASES - ITB DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.	113
FIGURA 8.18 - MAPA DE ISOVALORES DE RAZÃO DE ABSORÇÃO DE SÓDIO - SAR DO SAU (GRUPO 1) - ETAPAS 1 E 2.....	114
FIGURA 8.19 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE ÁGUA PARA ANÁLISE DE CONTEÚDO BACTERIOLÓGICO DO SAU E SAA.	116
FIGURA 8.20 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE $\delta^{18}O$ E δD DO SAU E SAA - ETAPA 2.	118
FIGURA 8.21 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ^{14}C (IDADE E PMC) NO SAU E SAA - ETAPA 2.....	120
FIGURA 8.22 - MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DE TRÍTIIO (3H) NO SAU E SAA - ETAPA 2.....	121
FIGURA 8.23 - PERFIL ESQUEMÁTICO COMPARANDO AS LINHAS DE FLUXO SEGUINDO A TRAJETÓRIA SIMULADA E A TRAJETÓRIA QUE SE AJUSTA ÀS IDADES OBTIDAS PELAS DATAÇÕES DE RADIOCARBONO. AS CÉLULAS RIOS REPRESENTAM AS DRENAGENS, E AS AMOSTRADAS REPRESENTAM AS CÉLULAS INTERCEPTADAS PELOS POÇOS EM PROFUNDIDADE.....	122
FIGURA 8.24 - ÍNDICES DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS (FOSTER & HIRATA, 1993).	125
FIGURA 8.25 - MAPA DE VULNERABILIDADE DO SAU SEGUNDO MÉTODO GOD.	126
FIGURA 8.26 - MAPA DE VULNERABILIDADE DO SAA SEGUNDO MÉTODO GOD.....	127
FIGURA 8.27 - MAPA DE VULNERABILIDADE DO SAU SEGUNDO MÉTODO AVI.	129
FIGURA 8.28 - MAPA DE RISCO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SAU.	132
FIGURA 8.29 - MAPA DE RISCO POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SAA.....	133

SUMÁRIO DE QUADROS

VOLUME 2

	PÁG.
QUADRO 7.1 - ÁREA DE OCORRÊNCIA DO SAU NOS ESTADOS	15
QUADRO 7.2 - RESUMO DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DAS SUB-BACIAS DO SAU.....	24
QUADRO 7.3 - RELAÇÕES HIDROLÓGICAS DAS SUB-BACIAS DO SAU	24
QUADRO 7.4 - RELAÇÃO DOS DADOS DE VARIAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BASE E PRECIPITAÇÃO NAS SUB-BACIAS	25
QUADRO 7.5 - ESTIMATIVA DE RECARGA NA ÁREA OPERACIONAL DO SAU.....	28
QUADRO 7.6 - RESERVAS HÍDRICAS DO SAU	35
QUADRO 7.7 - VALORES DE K DETERMINADOS PARA O SAU.....	47
QUADRO 7.8 - RESULTADO DO CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO PARA CADA BACIA	53
QUADRO 7.9 - VALORES DE RECARGA OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO	54
QUADRO 7.10 - VALORES DE RECARGA E RELAÇÃO RECARGA/PRECIPITAÇÃO UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	61
QUADRO 7.11 - VALORES DE RECARGA SIMULADOS PARA O PERÍODO DE 2021 A 2080.....	69
QUADRO 7.12 - UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS DO SAA DEFINIDAS COM BASE NAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DO GRUPO AREADO	77
QUADRO 7.13 - ESTIMATIVA DE RECARGA NA ÁREA OPERACIONAL DO SAA	80
QUADRO 7.14 - RESERVAS HÍDRICAS DO SAA.....	82
QUADRO 7.15 - ESTIMATIVA DO RAIO DE INFLUÊNCIA NO SAA.....	86
QUADRO 8.1 - CLASSES DE VULNERABILIDADE DO MÉTODO AVI	128
QUADRO 8.2 - CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DAS CLASSES DE USO DO SOLO NAS ÁREAS DO SAU E SAA	130
QUADRO 8.3 - MATRIZ DE ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE RISCO	131

SUMÁRIO

VOLUME 2

PÁG.

APRESENTAÇÃO.....	2
7. AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO.....	11
7.1 SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA – SAU	14
7.1.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual do SAU	14
7.1.2 Balanço Hídrico	21
7.1.3 Avaliação da Recarga do SAU	27
7.1.4 Reservas e Disponibilidades Hídricas do Sistema Aquífero Urucua	30
7.1.5 Potencialidades do Sistema Aquífero Urucua (Zoneamento das Vazões Explotáveis)	37
7.1.6 Modelagem de Fluxo do SAU.....	41
7.1.7 Avaliação de Cenários de Mudanças Climáticas no SAU	58
7.2 SISTEMA AQUÍFERO AREADO – SAA	71
7.2.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual do SAA	71
7.2.2 Avaliação da Recarga do SAA.....	80
7.2.3 Reservas e Disponibilidades Hídricas do Sistema Aquífero Areado	82
7.2.4 Potencialidades do Sistema Aquífero Areado (Zoneamento das Vazões Explotáveis)	85
8. HIDROGEOQUÍMICA, VULNERABILIDADE E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO	89
8.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS DO SAU E SAA	89
8.1.1 Rede de Amostragem de Águas Subterrâneas e Parâmetros Analisados	89
8.1.2 Métodos de Análise e de Tratamento de Dados Hidroquímicos.....	91
8.1.3 Interpretação dos Resultados das Análises.....	91
8.1.4 Análise Estatística	97
8.1.5 Mapas de Zoneamento Hidrogeoquímico	101
8.1.6 Qualidade da Água	115
8.1.7 Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério (δD)	117
8.1.8 Isótopos Radioativos de Carbono 14 (^{14}C) e Trítio (^3H).....	119
8.1.9 Idade Radiométrica x Modelo Hidrogeológico.....	122
8.2 VULNERABILIDADE NATURAL DO SAU E DO SAA.....	123
8.3 RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DO SAU E DO SAA	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

7. AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS URUCUIA E AREADO

A avaliação hidrogeológica realizada nestes estudos compreende os sistemas aquíferos Urucua (SAU) e Areado (SAA), considerados aqui neste trabalho dois sistemas aquíferos independentes.

Embora tenham sido considerados inicialmente como um sistema aquífero único, o Sistema Aquífero Urucua-Areado, apresentou-se com propriedades hidrogeológicas distintas. A maior complexidade litofaciológica e características hidrogeológicas peculiares das rochas constituintes do Grupo Areado, como a interdigitação com as rochas vulcânicas do Grupo Mata da Corda, aliadas à ausência de conexão hidráulica entre as sub-bacias geológicas (Abaeté e Urucua), mostraram que esses reservatórios subterrâneos deveriam ser tratados como sistemas aquíferos distintos. Esse entendimento foi corroborado pelos resultados das análises hidrogeoquímicas, onde as águas desses sistemas aquíferos mostraram características químicas diferentes.

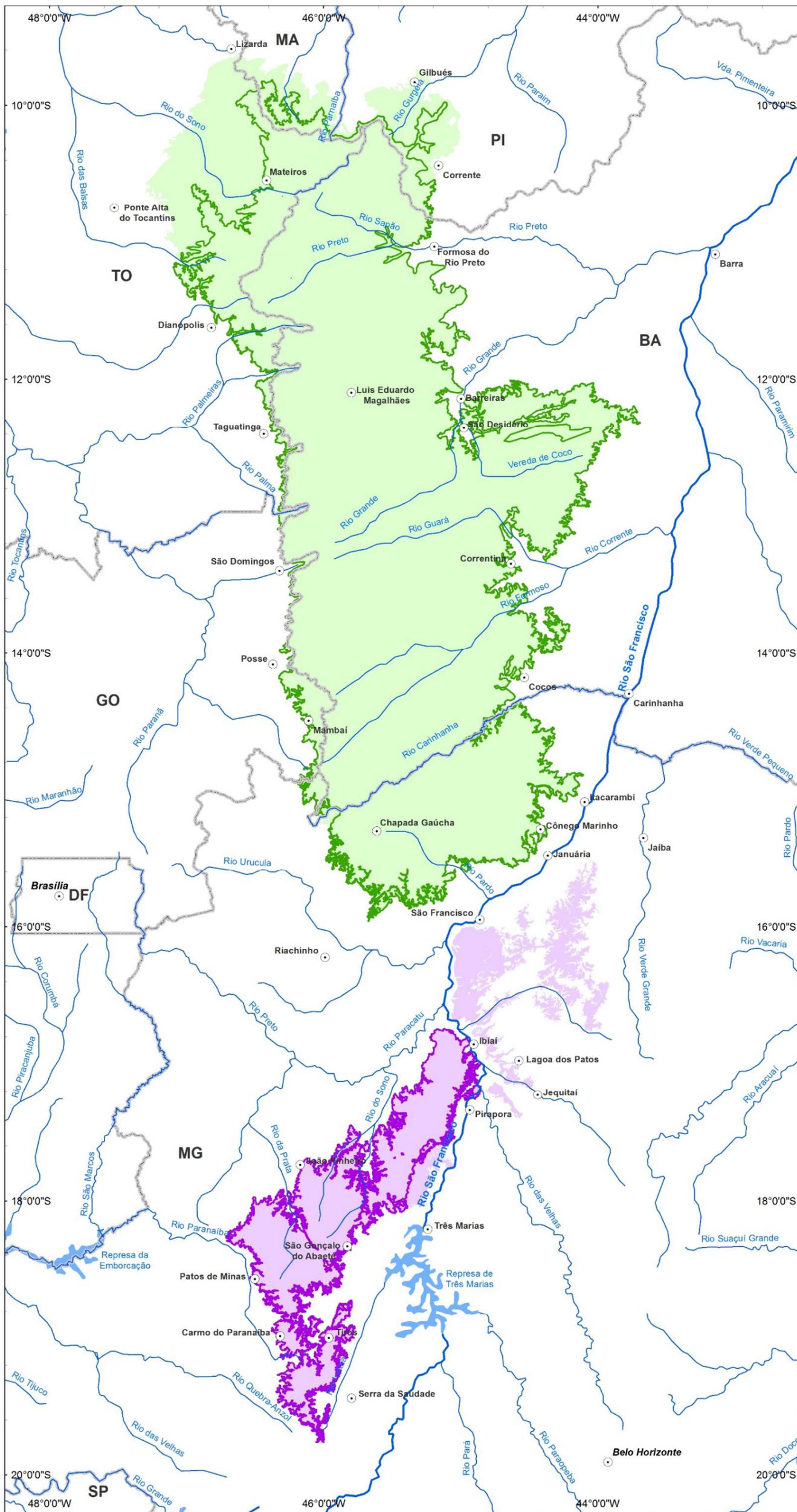
Assim, propôs-se a manutenção do nome Sistema Aquífero Urucua (SAU) para o “reservatório subterrâneo” constituído pelas rochas do Grupo Urucua, parte norte da área de estudo (sub-bacia Urucua); e a designação de Sistema Aquífero Areado (SAA) para o reservatório constituído pelas rochas do Grupo Areado e Mata da Corda, reunidas na parte sul da área (sub-bacia Abaeté). Essas sub-bacias são delimitações geológicas, com limites geográficos idênticos aos dos sistemas aquíferos SAU e SAA, portanto, coincidentes com as suas áreas de afloramento (Figura 7.1).

Considerando a separação entre os sistemas aquíferos, procedeu-se, posteriormente, a delimitação das “áreas operacionais” do SAU e do SAA, consideradas nos cálculos de reservas, geração de mapas temáticos e modelagens (quando disponíveis). Além do uso do SIG e do conhecimento das propriedades físicas da região, foram feitos levantamentos geológicos para checagem de limites de afloramentos das rochas dos grupos Urucua e Areado e rochas do embasamento nos seis estados abrangidos pelo estudo. Essas áreas deverão ser revistas ao longo do tempo, em decorrência do natural avanço do conhecimento técnico. Ressalta-se, entretanto, que o levantamento de dados desses estudos considerou a área total de afloramento dos grupos de rochas do Urucua e Areado, conforme estabelecido nos Termos de Referência.

Assim sendo, do ponto de vista “operacional”, considerou-se os limites do SAU aqueles delineados no mapa da Figura 7.1. Os limites estabelecidos, a princípio, foram aproximadamente delineados com auxílio de aplicativo do ArcGis, por meio do qual foram identificadas e descartadas porções da parte norte da bacia com altitudes inferiores a 500 metros, tendo como referência o modelo digital de elevação do SAU. Em seguida, estes limites foram ajustados manualmente, de maneira a coincidir com as quebras de relevo e assumir nova configuração. Neste contexto, a área operacional do SAU foi calculada em 109.531 Km².

Os limites operacionais do Sistema Aquífero Areado (SAA), por sua vez, foram considerados aqueles que englobam apenas o corpo de afloramento principal das rochas dos grupos Areado e Mata da Corda, que somam 15.485 Km², conforme apresentado na Figura 7.1.

Esta avaliação hidrogeológica compreende a integração de diversos levantamentos (geologia, geomorfologia, solos, uso e ocupação da terra, geofísica, cadastro de poços e nascentes, hidrologia) efetuados ao longo do trabalho e compilados de pesquisas anteriores. Os sistemas aquíferos são apresentados aqui em itens separados, sendo que algumas análises como o balanço hídrico e modelagem de fluxo, não puderam ser concluídas para o Sistema Aquífero Areado pela escassez de informações.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Massas d'água
- Limite Estadual

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU
- SAA
- Limites operacionais do SAU
- Limites operacionais do SAA

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGE CORPS
 WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Mapa de localização do SAU e SAA, modificado de CPRM (2007)

ESCALA NUMÉRICA
 1:3.000.000

NUMERO FIGURA
 7.1

ESCALA GRÁFICA
 0 10 20 40 60 80 Km

Figura 7.1 – Localização geográfica das áreas do SAU e do SAA.

7.1 SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA – SAU

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) está entre os mais importantes aquíferos de extensão regional do País. Sua importância transcende a estritamente hidrogeológica haja vista sua considerável contribuição para as vazões de base do rio São Francisco, conforme relatado com detalhes no Tomo II do Volume 1 deste Relatório Final. Em virtude de sua influência considerável sobre a vazão do rio da Integração Nacional e devido a sua importância para a economia local, tendo a água como insumo fundamental nas atividades agropecuárias, especialmente do oeste baiano, o SAU é foco de diversas pesquisas acadêmicas e estudos.

Este capítulo reúne o conhecimento hidrogeológico alcançado a partir da compilação do resultado de diversas ferramentas utilizadas neste trabalho, como a hidrologia, geologia, geofísica, análise de imagens de satélites, hidroquímica, entre outras.

O SAU tem neste estudo uma área operacional de 109.531 Km², estabelecido pela consultoria executora dos estudos com base em critérios geológicos e geomorfológicos, conforme detalhado no volume 1 Tomo I deste Relatório Final. Destaca-se, contudo, que embora tenha sido definida uma “área operacional” para fins de cálculos de reservas e modelagem do Sistema Aquífero, o levantamento de dados dos estudos abrangeu toda área de afloramento dos grupos Urucuia, conforme definida nos termos de referência dos estudos.

7.1.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual do SAU

O modelo hidrogeológico conceitual descreve de maneira simplificada o arcabouço hidroestratigráfico dos aquíferos, o comportamento do fluxo subterrâneo e a interação de suas águas como parte do ciclo hidrológico.

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

O SAU ocupa no total 126.468 Km² de área de chapadões aplainados que se destacam no relevo, com altitudes variando de 500 a 1.000 metros. As maiores altitudes são observadas no bordo oeste, nos limites com os Estados de Goiás e Tocantins, onde a Serra Geral de Goiás configura-se como principal feição do relevo. Sua área de exposição mostra formato alongado segundo a direção aproximada Norte-Sul, com comprimento de cerca de 680 km e largura variável entre 170 e 280 km na direção Leste-Oeste.

Resquícios de sedimentos atribuídos ao SAU, preservados em morros testemunhos e porções isoladas do corpo principal, testificam sua maior extensão pretérita. Sua maior área de exposição ocorre em território baiano, onde alcança 82.050 Km², ou seja, 65% da área total, conforme apresentado no Quadro 7.1.

QUADRO 7.1 – ÁREA DE OCORRÊNCIA DO SAU NOS ESTADOS

<i>Estados</i>	<i>Área (Km²)</i>	<i>Percentual no Estado</i>
Bahia	82.050	65%
Goiás	1.827	1%
Maranhão	2.709	2%
Minas Gerais	16.731	13%
Piauí	4.460	4%
Tocantins	18.692	15%
TOTAL	126.468	100%

A conformação atual da bacia de acumulação dos sedimentos constituintes do aquífero mostra uma calha de direção aproximada NNW, com os bordos este e oeste do embasamento alçados em relação ao seu eixo (Figura 7.2).

As maiores espessuras preservadas do SAU encontram-se na metade norte da área, podendo alcançar cerca de 400 metros (Figura 7.3), segundo a interpretação geofísica dos consultores do consórcio deste trabalho. Sabe-se, todavia de poços produtivos com espessuras maiores do que aquelas interpretadas com o uso da geofísica, além de poços estratigráficos perfurados na região pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) que atravessaram pacote rochoso do SAU mais espesso, conforme discutido de forma mais detalhada no item 5.2 do Volume 1 Tomo I, deste Relatório Final.

As altitudes relativamente elevadas e a depressão do embasamento são responsáveis pelas espessuras mais imponentes daquele setor. A distribuição das espessuras saturadas também segue o mesmo padrão, apresentada mais adiante na figura 7.8, item 7.4 (Reservas, Disponibilidades e Potencialidades dos Sistemas Aquíferos Urucua e Areado).

Esse arcabouço geológico confere ao SAU a tipologia de aquífero do tipo granular ou poroso, regionalmente homogêneo e livre. O modelo conceitual de fluxo subterrâneo estabelecido para essas condições é aquele de fluxo laminar em meio poroso, governado, de modo geral, pela área de drenagem das bacias hidrográficas associadas.

Nesse modelo, parte do excesso da água da chuva que atinge a superfície da bacia hidrográfica, após evaporação e escoamento superficial, chega ao aquífero através da infiltração pelas camadas superiores do solo não saturado, constituindo a recarga, que corresponde a uma parcela da precipitação que atinge a zona saturada do aquífero. A recarga média estimada para toda a área do SAU foi de 217 mm anuais, valor que corresponde a 18% da precipitação média anual; valor obtido com base nos resultados da avaliação hidrológica das vazões das estações fluviométricas que drenam o SAU, do período de 1975 a 2005.

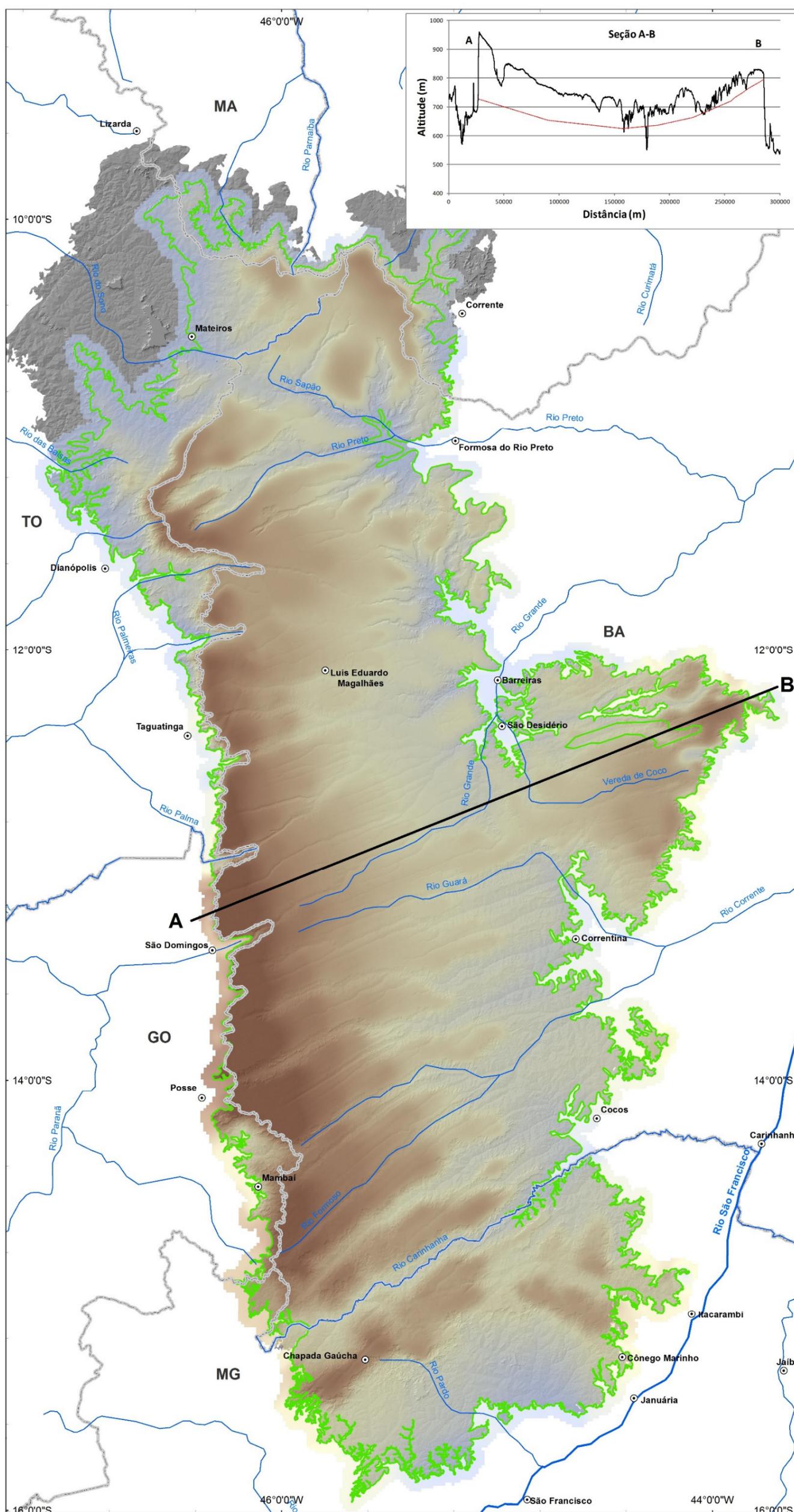
O fluxo de água no processo da recarga é mais lento onde as camadas superficiais tem baixa condutividade hidráulica, devido ao maior conteúdo argiloso do solo ou em virtude de alterações ocasionadas pelo manejo do solo por práticas agrícolas convencionais, como no oeste baiano, por exemplo. O fluxo, contudo, é mais rápido onde o solo apresenta elevada condutividade hidráulica, especialmente em solos arenosos, situados em superfície plana, como nas áreas de chapada.

Ensaio na parte superficial das áreas de recarga do SAU mostraram que as taxas de infiltração de água nos solos de áreas agrícolas são, quase sempre, menores (média de 5,62 L/h) do que as taxas obtidas nos solos de áreas de cerrado (média de 24,42 L/h), a despeito de ambas as classes apresentarem características granulométricas similares. Matos (2005), todavia, conduziu testes na região do oeste baiano, onde simulou chuvas em áreas de vegetação natural, plantio convencional e plantio direto. Os resultados mostraram que as áreas que empregam a técnica do plantio direto podem ter uma infiltração acumulada no solo tão boa quanto aquela nos solos com Cerrado preservado.

As águas das chuvas que alcançam o solo e se infiltram até atingir a zona saturada, movem-se lentamente de acordo com o gradiente hidráulico e as propriedades de condutividade hidráulica do terreno, quase horizontalmente, da região de maior para a de menor potencial hidráulico. Em alguns locais, todavia, o fluxo é retido em níveis silicificados, onde ocorre a formação de aquíferos suspensos, mais rasos que o nível potenciométrico regional. A medida que essa superfície potenciométrica mais rasa intercepta a topografia ocorre a formação de lagoas naturais perenes, como as dos rios Pratudinho, Pratudão e Formoso, afluentes da bacia hidrográfica do rio Corrente, parte sul da região do SAU.

Gaspar (2006) classificou dentro do SAU aquíferos suspensos locais, onde os níveis silicificados funcionam como um aquitarde, retardando a drenagem vertical da água, o que permite o acúmulo de água mais raso que o nível d'água regional. Martins et al. (1993) citaram a presença de "aquíferos suspensos temporários" identificados na bacia do rio Arrojado, parte sul da área. Os autores associaram a presença desse tipo de aquífero na área com um adensamento da vegetação em superfície, sendo descartada a hipótese de variações da fertilidade nos solos analisados. A presença do argilomineral lepidocrocita nos mosqueados dos perfis de solos evidenciou, segundo os autores, reações de redução nos minerais por estagnação temporária da água.

A superfície potenciométrica regional normalmente possui configuração muito semelhante à superfície topográfica no SAU, de modo que em termos práticos, o fluxo subterrâneo natural ocorre das mais altas altitudes para as mais baixas, ou seja, de oeste (limite da Serra Geral de Goiás) para leste (em direção as sedes municipais do oeste baiano).



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU
- Seção altimétrica

Altitude (m)



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Uruculia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Modelo digital de terreno (MDT) do SAU e seção altimétrica A-B

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000 NÚMERO FIGURA: 7.2

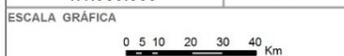
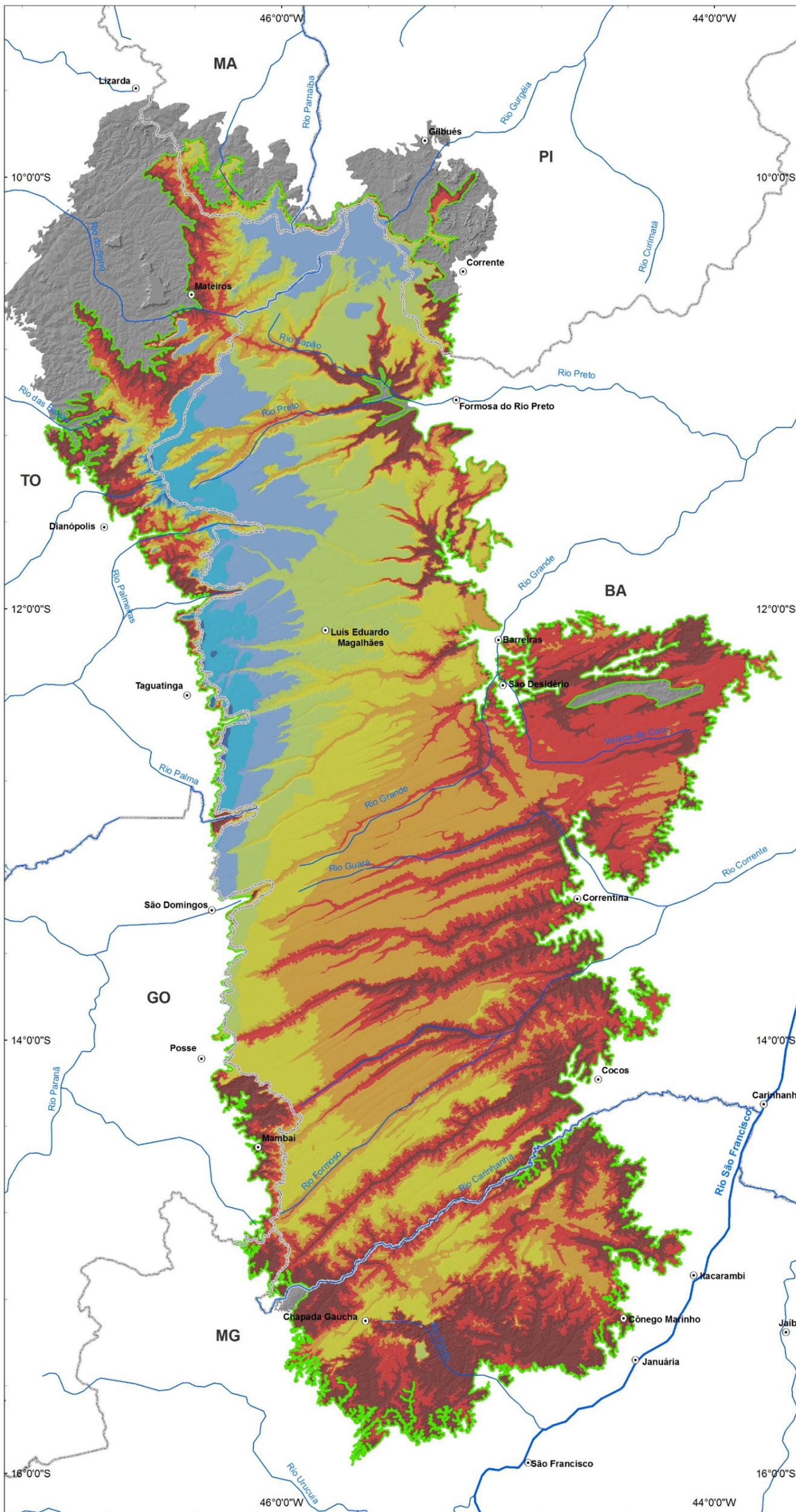


Figura 7.2 - Modelo digital de terreno (MDT) do SAU e seção altimétrica A-B.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Espessura (m)

- 0 - 50
- 50,1-100
- 100,01-150
- 150,01-200
- 200,01-250
- 250,01-300
- 300,01-350
- 350,01-400



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10 000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do SAU e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Mapa de espessura do SAU

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000 NÚMERO FIGURA: 7.3

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 Km

Figura 7.3 - Mapa de espessura do SAU

Um divisor hidrogeológico de direção aproximada Norte-Sul que não coincide com o divisor hidrográfico divide esse fluxo regional da água subterrânea. A partir desse divisor parte do fluxo se dirige para leste, alimentando as drenagens que constituem os afluentes do médio São Francisco, enquanto que a parte do fluxo que se dirige para oeste alimenta os afluentes do Alto Tocantins. Outros divisores de fluxo subterrâneo também são observados em outros locais do Sistema Aquífero, onde o fluxo de água se direciona para sentidos opostos. Esse comportamento pode ser observado no mapa potenciométrico do SAU (Figura 7.4). Gaspar (2006), CPRM & UFBA (2007) e Amorim Jr. & Lima (2007) esboçaram uma delimitação do divisor subterrâneo do SAU, mostrando a divergência com relação ao divisor hidrográfico.

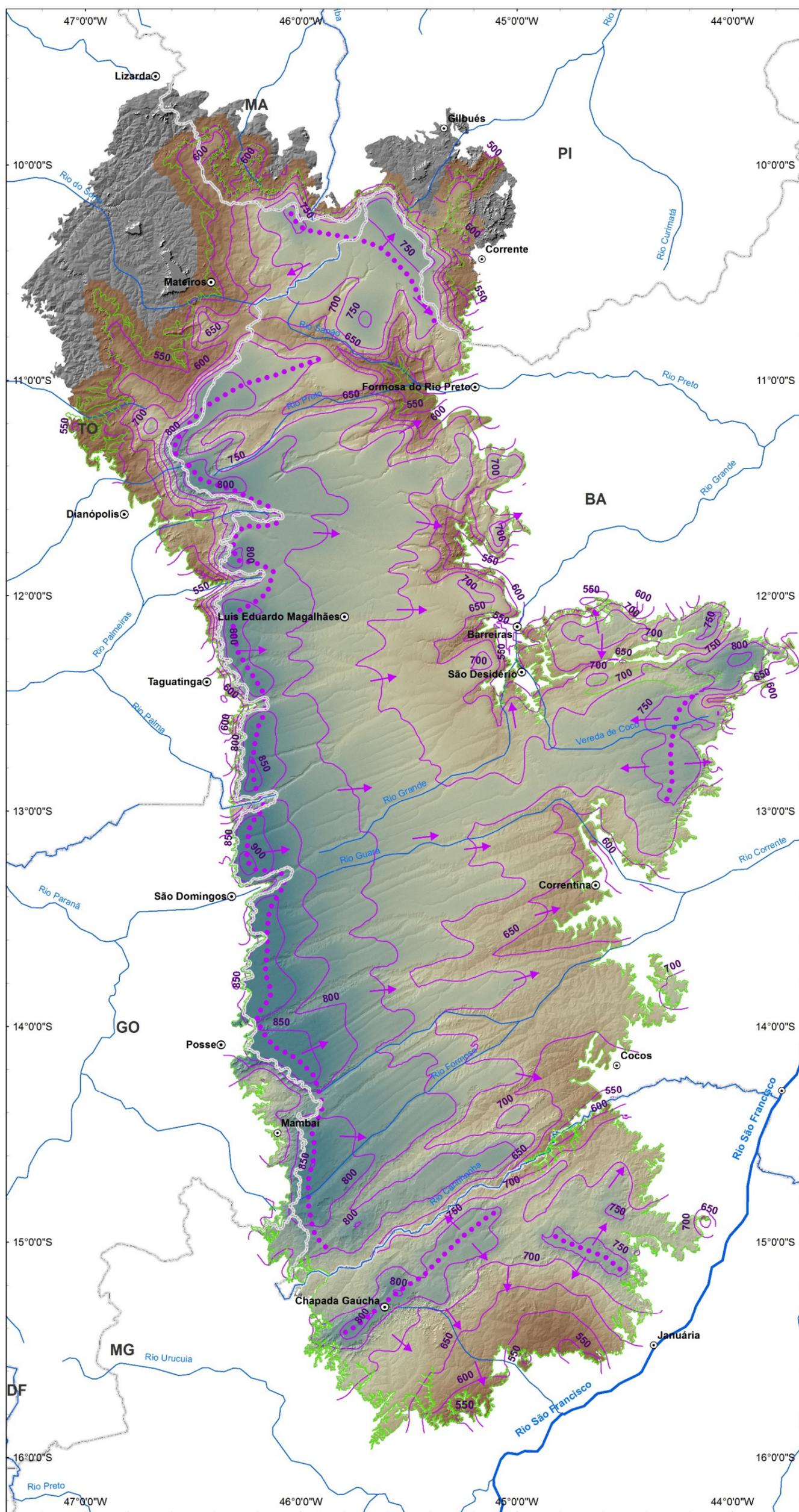
Os gradientes hidráulicos são normalmente suaves, menores do que 0,5% (ou 0,005 m/m) em praticamente toda a área do SAU, tornando-se mais íngremes próximos às áreas de descarga, onde podem alcançar 4% (ou 0,04 m/m), como por exemplo, no limite oeste do SAU, onde o fluxo subterrâneo alimenta as drenagens da bacia hidrográfica do rio Tocantins.

O armazenamento da água no SAU se dá nos poros dos sedimentos constituintes das rochas, as quais são predominantemente arenitos quartzosos, argilitos e níveis de conglomerados associados a cimentação silicosa. Esses níveis de rochas silicificadas não são contínuos, mas sua presença confere localmente ao Sistema Aquífero um comportamento semiconfinado, onde a drenagem vertical é retardada pelo fato desses níveis apresentarem uma condutividade hidráulica menor que aquela dos arenitos. Vários poços que atravessam esses níveis em meio ao pacote de rochas do SAU, apresentam níveis potenciométricos mais rasos que o regional, mostrando que localmente a água está armazenada a uma pressão superior a da atmosfera. Esses níveis silicificados tem espessuras variadas e ocorrem especialmente na parte superior do pacote rochoso, pertencente à Formação Serra das Araras.

Uma parcela desse armazenamento é descarregada para as drenagens das bacias hidrográficas em forma de escoamento básico, caracterizando o regime efluente dos cursos de água superficiais, representados na parte leste pelos importantes afluentes do rio São Francisco (Carinhanha, Corrente, Grande) e na parte oeste por afluentes da margem direita do rio Tocantins (Paraná, Manuel Alves e Rio do Sono).

A extensão da área drenada no sentido leste e a capacidade de armazenamento do aquífero mostra a importância da contribuição da água subterrânea no fluxo de base que sustenta o rio São Francisco, estimada em 730 m³/s, ou 18% da precipitação total. A contribuição no sentido oposto, para a Bacia Hidrográfica do Tocantins, é de 215 m³/s ou seja, 17% da precipitação total.

Dados hidrodinâmicos obtidos de testes de bombeamento enquadram o aquífero no modelo “não confinado com drenagem retardada”, proposto por Neuman (1975). Suas condutividades hidráulicas mensuradas são geralmente superiores a 2 m/d; o efeito elástico do armazenamento é atestado por coeficientes da ordem de 10⁻⁴ e as porosidades efetivas situam-se em 14%.



Convenções Cartográficas

- ⊙ Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite estadual
- Massas d'água

Legenda

- Linhas equipotenciais
- Direção de fluxo subterrâneo
- Divisores de água subterrânea
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
Acréscidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
ACIÓNSIA NACIONAL DE ÁGUAS

ENGE
CORPUS

WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Mapa potenciométrico do SAU

ESCALA NUMÉRICA
1:1.900.000

NUMERO FIGURA
7.4

ESCALA GRÁFICA
0 5 10 20 30 40 Km

Figura 7.4 - Mapa potenciométrico do SAU.

7.1.2 *Balanço Hídrico*

O balanço hídrico descreve os vários componentes do ciclo hidrológico, como precipitação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, evaporação e transpiração, e obedece ao princípio da continuidade ou da conservação de massa, segundo o qual, a diferença entre as entradas e saídas é igual à variação do armazenamento do sistema. O balanço hídrico é um cálculo muito utilizado para estimar a infiltração ou a recarga em aquíferos não confinados, ou seja, o percentual da precipitação que efetivamente infiltra nos aquíferos, denominado de coeficiente de infiltração em ANA (2013).

O complexo físico que forma uma bacia de drenagem atua como vários reservatórios de armazenamento efetivo, transformando a precipitação em escoamento superficial e subterrâneo, perdendo parte por meio da evaporação (DAEE 1976). Considerando a bacia hidrográfica um sistema fechado, no qual os limites topográficos coincidem com os divisores subterrâneos e não há fluxo de água proveniente de bacias contíguas através de seu perímetro, a diferença entre as entradas e saídas de água é igual à variação de armazenamento dentro do sistema e configura o que se conhece por balanço hídrico, definido pela relação:

$$P = Es + Ev + Eb + \Delta S$$

Onde: P é a precipitação; Es, escoamento superficial direto; Ev, a evapotranspiração real; Eb, o escoamento de base; ΔS , a variação de armazenamento.

No balanço hídrico calculado neste trabalho, entretanto, levou-se em consideração a assimetria entre a bacia hidrográfica e a hidrogeológica e tomou-se como referência a área de contribuição do aquífero a partir do divisor hidrogeológico e não toda a área de drenagem das bacias hidrográficas que o contém. O balanço foi avaliado com base nos componentes de fluxo obtidos da análise hidrológica desenvolvida neste estudo, disponível no Volume 1 Tomo II deste Relatório Final. Nos cálculos desses componentes, considerou-se a proporcionalidade da área do SAU dentro das áreas de drenagem dos postos fluviométricos avaliados.

Seis postos fluviométricos foram utilizados nessa avaliação: Formosa do Rio Preto (Médio/Baixo Rio Grande); São Sebastião (Alto Rio Grande); Santa Maria da Vitória (Rio Corrente); Lagoa das Pedras (Rio Carinhanha); Capitânea (Rio Carinhanha); Usina dos Pandeiros Montante (Pandeiros/Pardo/Mangai). Esses postos estão situados próximo ao limite de afloramento das rochas do SAU, e têm dentro de suas áreas de drenagem entre 88 e 100% da área do SAU. Deste modo, suas vazões são consideradas como representativas do deflúvio desse sistema aquífero (Figura 7.5).

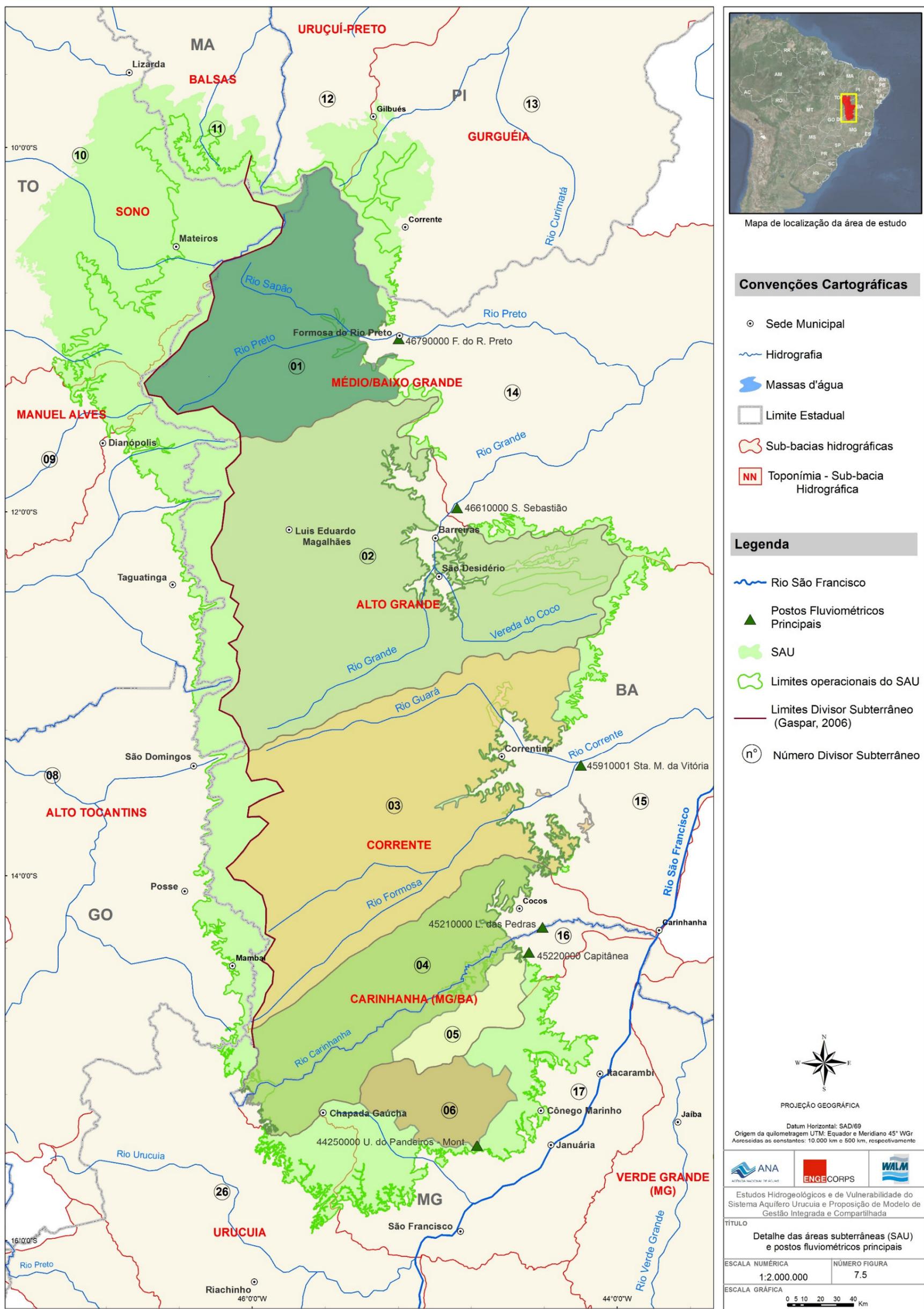


Figura 7.5 – Detalhe das áreas subterrâneas (SAU) e postos fluviométricos principais.

Ponderando que a análise feita utilizou um período longo de dados (30 anos, de 1975 a 2005), a variação de armazenamento na bacia pode ser desprezada, uma vez que os valores estatísticos médios compensam a variação de valores das séries históricas. Assim, a equação do balanço hídrico para um sistema em equilíbrio (Figura 7.6) reduz-se a:

$$P = Es + Ev + Eb$$

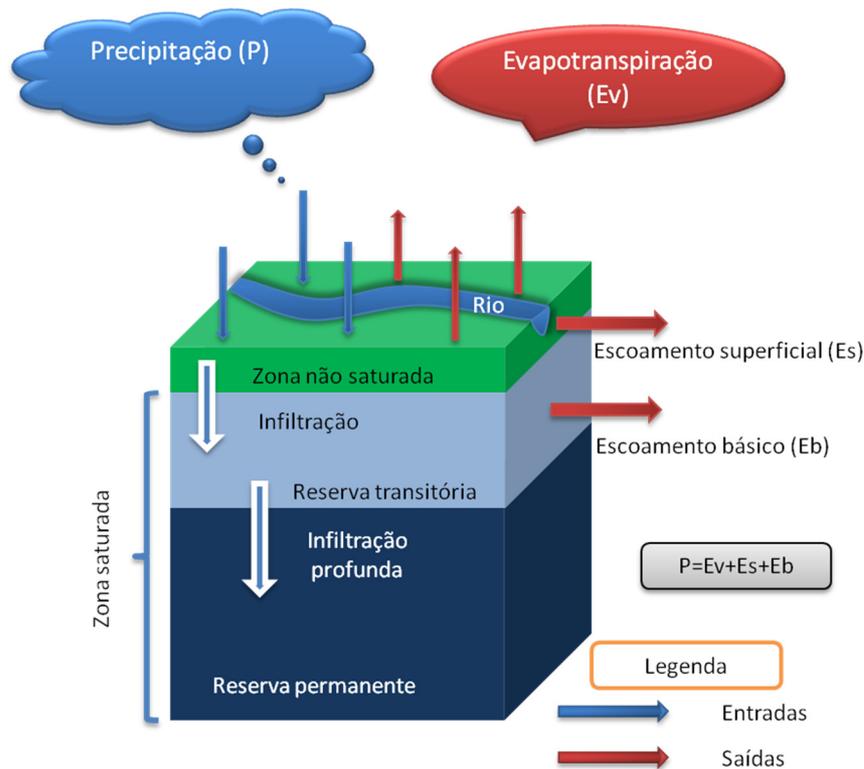


Figura 7.6 - Representação esquemática dos termos da equação do balanço hídrico.

É importante ressaltar que um sistema em equilíbrio é aquele no qual os fluxos de entrada e de saída são iguais, ou seja, em nenhum momento ocorre escassez ou excesso de água no armazenamento. Depreende-se, portanto, que a dinâmica de circulação é contínua e o armazenamento é estável.

Conhecidas as vazões de base (Eb) e superficiais (Es), e a precipitação média (P) nas sub-bacias da área de estudo, o último componente do balanço hídrico, a evapotranspiração (Ev), foi estimada pela diferença entre precipitação e os demais componentes conhecidos da equação. Os resultados do balanço hídrico anual são apresentados no Quadro 7.2, onde Et representa o escoamento total (Eb+Es) do SAU na respectiva sub-bacia.

QUADRO 7.2 - RESUMO DOS PARÂMETROS HIDROLÓGICOS DAS SUB-BACIAS DO SAU

Posto	Nome do Posto	Rio	Área SAU (Km ²)	Precipitação média anual (mm)	Eb SAU (mm/ano)	Es SAU (mm/ano)	Et SAU (mm/ano)	Ev sau (mm/ano)
46790000	Formosa do Rio Preto	Preto	13.270	1.250	211,27	18,27	229,54	1.020,46
46610000	São Sebastião	Grande	28.046	1.300	185,62	11,74	197,36	1.102,64
45910001	Santa Maria da Vitória	Corrente	23.590	1.120	232,81	17,20	250,01	869,99
45210000	Lagoa das Pedras	Carinhanha	11.341	1.075	298,71	29,94	328,65	746,35
45220000	Capitânea	Coxá	2.313	1.050	151,01	17,29	168,29	881,71
44250000	Usina dos Pandeiros Montante	Pandeiros	3.389	1.100	183,22	40,06	223,28	876,72
Médias Ponderadas			81.949	1.194	217,93	18,22	236,15	957,48

Definidos os parâmetros hidrológicos, foram calculadas as relações entre os componentes do balanço (Quadro 7.3), o que permite estimar de forma expedita os componentes do balanço hídrico anual a partir do conhecimento da pluviometria média de uma região. Em termos médios, foram estabelecidas as seguintes relações hidrológicas:

- ✓ **Eb = 0,185 x P**
- ✓ Eb = 13,00 x Es
- ✓ Eb = 0,92 x Et
- ✓ Es = 0,02 x P
- ✓ Et = 0,20 x P
- ✓ Ev = 0,80 x P

Segundo observa-se nessas relações hidrológicas o escoamento de base médio, que corresponde diretamente à recarga do SAU corresponde a 18,5% da precipitação. Esse percentual é maior (28%) na bacia do Carinhanha.

QUADRO 7.3 - RELAÇÕES HIDROLÓGICAS DAS SUB-BACIAS DO SAU

Posto	Nome	Rio	Relações entre componentes do balanço hídrico					
			Eb/P	Es/P	Et/P	Ev/P	Eb/Et	Eb/Es
46790000	Formosa do Rio Preto	Preto	0,17	0,01	0,18	0,82	0,92	11,56
46610000	São Sebastião	Grande	0,14	0,01	0,15	0,85	0,94	15,81
45910001	Santa Maria da Vitória	Corrente	0,21	0,02	0,22	0,78	0,93	13,54
45210000	Lagoa das Pedras	Carinhanha	0,28	0,03	0,31	0,69	0,91	9,98
45220000	Capitânea	Coxá	0,14	0,02	0,16	0,84	0,90	8,74
44250000	Usina dos Pandeiros Montante	Pandeiros	0,17	0,04	0,20	0,80	0,82	4,57
Médias Ponderadas			0,185	0,02	0,20	0,80	0,92	13,0

Quando observamos o comportamento histórico do escoamento básico ou de base nas sub-bacias avaliadas do SAU, nota-se um decréscimo da vazão de base após um pico por volta do ano de 1980, resultando em série de valores inferiores à média. Segundo Albuquerque & Chaves (2011), no rio das Fêmeas – período entre 1977 e 2007 – ocorreram quedas significativas de vazão ao longo dos anos hidrológicos, apresentando resultados semelhantes aos observados. Tal comportamento, entretanto, é coerente conforme se confronta os dados de vazão das estações com os dados de precipitação na região, do mesmo período, e certamente inclui, entre outros fatores não analisados aqui, o reflexo da diminuição da precipitação a partir do ano de 1980 (Quadro 7.4).

Ao analisar as curvas de variação do escoamento de base calculado nas estações fluviométricas dos rios Pandeiros, Carinhanha, Coxá, Corrente, Grande e Preto, também se levou em consideração a estação pluviométrica mais próxima para cada uma das seis estações fluviométricas, de forma a analisar o escoamento de base (Qb) / precipitação (P) nas sub-bacias estudadas (Figura 7.7), considerando o mesmo intervalo de anos das estações fluviométricas.

QUADRO 7.4 – RELAÇÃO DOS DADOS DE VARIAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BASE E PRECIPITAÇÃO NAS SUB-BACIAS

Bacia do Rio	Total de Dados Analisados	% de Dados com Variações Negativas em Relação ao Total de Dados		% de Dados com Variações Negativas após 1980 em Relação ao Total de Dados com Variações Negativas	
		Escoamento de Base (Qb)	Precipitação (P)	Escoamento de Base (Qb)	Precipitação (P)
Pandeiros	31	58%	52%	78%	88%
Carinhanha	35	57%	54%	70%	84%
Coxá	35	49%	49%	82%	76%
Corrente	29	48%	52%	100%	100%
Grande	36	50%	47%	67%	82%
Preto	36	53%	56%	74%	85%

Dessa forma, analisando-se a variação do escoamento de base e precipitação dentro de cada sub-bacia, e os dados observados no Quadro 7.4, nota-se que há uma tendência geral de decréscimo a partir de meados da década de 80 para as duas variáveis em todas as sub-bacias, acompanhando a mesma tendência de diminuição geral da precipitação observada na Figura 7.7, com valor no mínimo de 67% de variações negativas após 1980 para o escoamento de base na bacia do rio Grande e no máximo de 100% para a bacia do rio Corrente.

Portanto, pode-se dizer que há uma redução de precipitação e do escoamento de base a partir da década de 80, porém há que se considerar que as variações, seja de aumento ou redução, são mais acentuadas na precipitação em todas as sub-bacias conforme Figura 7.7, e que conforme Quadro 7.4, há maior número de reduções, após 1980, em precipitação do que em escoamento de base em praticamente todas as bacias, exceto para a sub-bacia do rio Coxá. Esses dados confirmam efeitos de variação climática que afetam a precipitação e, conseqüentemente, a recarga do aquífero.



Figura 7.7 - Variação do escoamento de base nas estações fluviométricas avaliadas associada à variação da precipitação nas estações pluviométricas mais próximas.

A redução do escoamento subterrâneo nas seis estações fluviométricas estudadas, favorece a tese de efeito climático como principal causa dessa diminuição, uma vez que efeitos locais de extração de água não deveriam retratar iguais tendências em diferentes bacias. Entretanto, não se pode descartar a conjugação dos efeitos de extração de água subterrâneas e superficiais na redução do fluxo de base.

Soma-se aos demais efeitos citados como responsáveis por essa diminuição o provável decréscimo do volume da infiltração, ocasionada pela retirada da vegetação natural e compactação dos solos das áreas de recarga do SAU.

Com relação às alterações das taxas de infiltração de água no solo que cobre o SAU, decorrentes das atividades agrícolas que se intensificaram e se expandiram a partir das décadas de 80 e 90, principalmente com o cultivo de grãos, cultivos perenes e lavoura irrigada (Mendonça, 2006), foram analisados valores obtidos em ensaios pelo método do infiltrômetro de anel duplo em áreas distinguidas como agrícolas (fazendas) e áreas naturais (cerrado), de modo a permitir uma avaliação dos possíveis efeitos nas taxas potenciais de recarga. Os resultados dos ensaios realizados no SAU mostraram que as taxas de infiltração de água nos solos com atividades agrícolas são, quase sempre, menores do que as taxas obtidas nos solos com cobertura de cerrado.

Gonçalves et al (2016), também compararam as variações do fluxo de base e pluviometria para sub-bacia do rio Grande. Segundo avaliado pelos autores, a taxa de diminuição do fluxo de base (0,75 a 3,04% ao ano) é mais acentuada do que a queda da pluviometria (0,07% a 0,88% ao ano) para o período analisado (1977 a 2013).

7.1.3 Avaliação da Recarga do SAU

Recarga é definida como a água que se move, a partir da superfície da terra ou da zona insaturada, para a zona saturada (Nimmo *et al.*, 2005). É um componente vital para avaliar a sustentabilidade de aquíferos, assim como é o escoamento superficial para a sustentabilidade dos rios. No balanço hidrológico de aquíferos, a relativa magnitude dos processos de recarga e descarga dá uma indicação do estado de conservação do recurso hídrico (Nimmo *et al.*, 2005).

Precipitações atmosféricas constituem as fontes naturais predominantes de recarga, mas outras possibilidades incluem água de irrigação no meio rural, água tratada derivada de vazamentos de redes adutoras de sistemas públicos em áreas urbanas, corpos de água superficiais (lagos, barramentos etc.) e, em alguns locais como no Texas (USA), água de recarga artificial.

A área de recarga do SAU é conceituada aqui como toda área exposta das rochas que constituem o SAU capaz de permitir a infiltração direta de águas pluviais. As condições de infiltração requerem que a zona não saturada tenha permeabilidade suficiente para permitir o fluxo descendente das águas precipitadas, de modo a alcançar a zona saturada do aquífero. A

continuidade da recarga exige que as condições pluviométricas atuais e condições de uso e ocupação do solo sejam mantidos.

Considerando que toda área exposta do aquífero é potencialmente apta a receber recarga proveniente de precipitação atmosférica, e que há necessidade de se estabelecer áreas com dimensões mais reduzidas de modo a facilitar sua proteção, novos critérios devem ser aplicados para identificação desses domínios. Um critério físico adequado para definição dessas áreas baseia-se na declividade do terreno. Áreas com baixa declividade topográfica conseguem reter águas pluviais por mais tempo e facilitar a infiltração no terreno, ao passo que, áreas com declividade alta favorecem o escoamento superficial.

Nesse sentido, definiu-se como critério para delimitação das áreas de recarga no SAU terrenos com declividades de até 2%. Áreas de descarga foram distinguidas pelas declividades do terreno maiores do que 2%, e também menores do que 2% quando associadas a cursos de água superficiais (planícies aluvionares). O mapa de áreas de recarga e descarga do SAU está apresentado na Figura 7.8. As áreas de recarga correspondem a 67% e as áreas de descarga a 33% da área operacional do Sistema Aquífero Urucuia (109.531 Km²).

Segundo observa-se no mapa, as áreas de descarga do SAU são representadas pelos cursos de água superficiais que recepcionam a água subterrânea depois de esta haver circulado pelo aquífero. A contribuição do escoamento subterrâneo se dá em toda a área marginal dos rios, lagoas e nas nascentes. Assim, os rios que drenam a área do SAU representam suas áreas de descarga e contribuem diretamente com as vazões dos rios São Francisco e Tocantins.

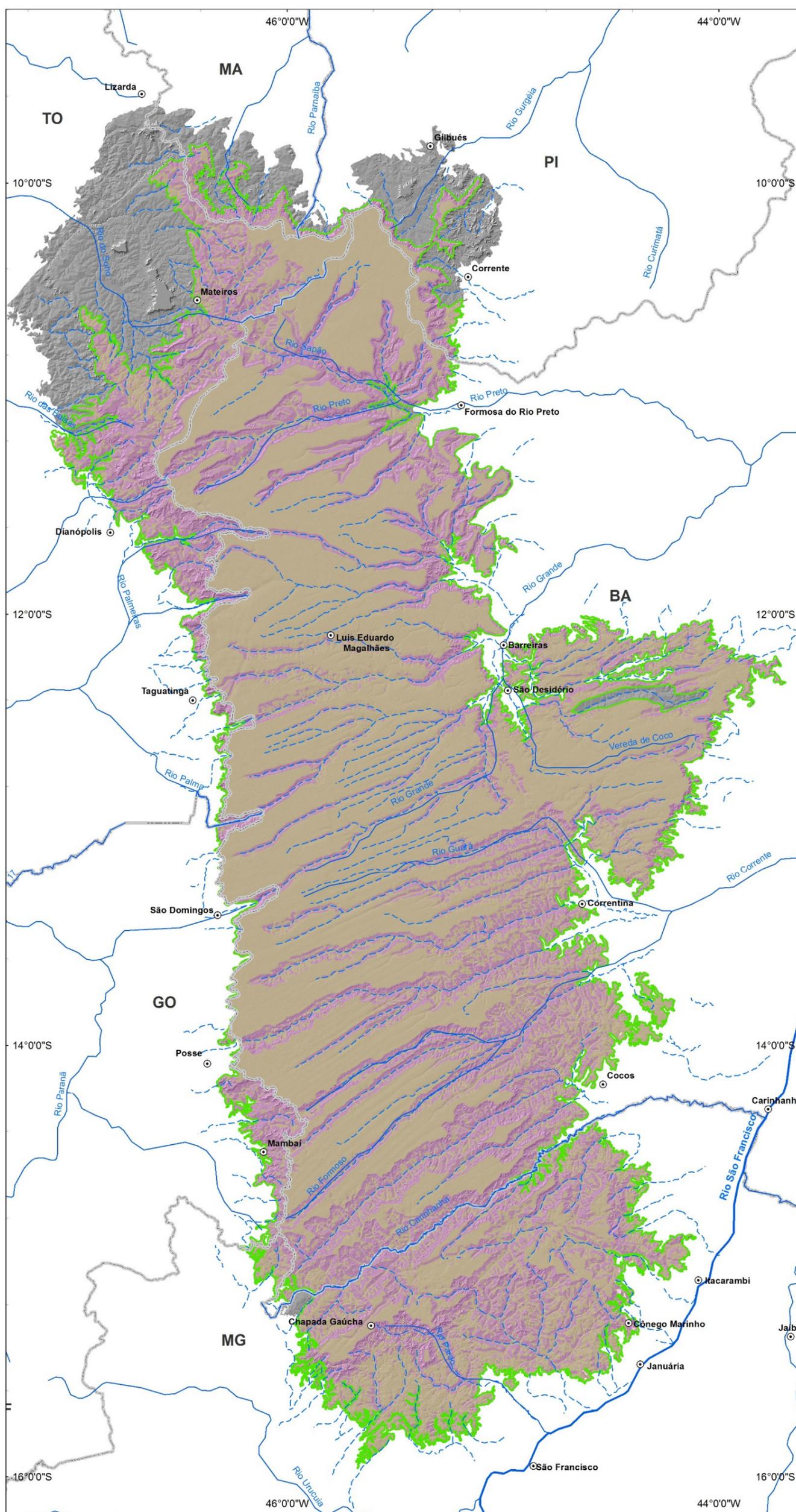
Dentre os métodos físicos de estimativa de recarga de aquíferos, os mais utilizados são o da variação do nível d'água subterrânea (VNA), o do balanço hídrico e o da estimativa pela Lei de Darcy. Em alguns casos, também são utilizados métodos de traçadores químicos. Em razão de sua simplicidade e flexibilidade de aplicação, e existência de dados, a estimativa de recarga neste estudo foi feita com base no conceito adotado no Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos, ANA (2013), segundo o qual a recarga do aquífero baseada nos dados de entrada (precipitação e coeficiente de infiltração), é equivalente a **Recarga Potencial Direta (RPD)** e é representada pelas seguintes relações: $RPD = A \cdot C_i \cdot P$

Considerando um coeficiente de infiltração de 18,5%, obtido da avaliação hidrológica, para a área operacional do SAU e a precipitação média anual de 1.194 mm, obteve-se para Recarga Potencial Direta um valor de 767 m³/s ou 24,19 km³/ano (Quadro 7.5).

$$RPD = 109.531 \text{ Km}^2 \cdot 18,5\% \cdot 1.194\text{mm} \rightarrow RPD = 24,19 \text{ Km}^3/\text{ano}$$

QUADRO 7.5 – ESTIMATIVA DE RECARGA NA ÁREA OPERACIONAL DO SAU

Área (Km ²)	Coef. Infiltração (%)	Precipitação média anual (mm)	RPD (m ³ /s)	RPD (km ³ /ano)
109.531	18,5	1.194	767,06	24,19



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rios - Descarga
- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU
- Áreas de recarga
- Áreas de descarga



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucui e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO: Áreas de recarga e descarga do Sistema Aquífero Urucui

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000 NÚMERO FIGURA: 7.8

ESCALA GRÁFICA: 0 5 10 20 30 40 km

Figura 7.8 - Áreas de recarga e descarga do Sistema Aquífero Urucui.

7.1.4 Reservas e Disponibilidades Hídricas do Sistema Aquífero Urucuia

Os cálculos das reservas e disponibilidade hídrica de aquíferos é de fundamental importância para a segurança na tomada de decisão dos órgãos gestores quanto a concessão de outorga de direito de uso, uma vez que as vazões mínimas referenciais para a outorga de águas superficiais estão ancoradas em vazões formadas essencialmente pelo escoamento de base, exceto pelos volumes regularizados. Embora sejam cálculos simples, leva-se em conta as características da rocha e a interdependência entre águas superficiais e subterrâneas.

A reserva reguladora ou sazonal corresponde à vazão ou volume que efetivamente infiltra nos aquíferos anualmente. A reserva permanente, por sua vez, representa o volume armazenado no aquífero abaixo do nível de oscilação sazonal.

A forma mais habitual de estimar esses volumes ou vazões considera para a reserva reguladora ou sazonal a oscilação do nível estático de um aquífero ou a vazão de base medida em uma estação fluviométrica. No que tange à reserva permanente, considera-se a área do aquífero, sua espessura e a porosidade efetiva, que reflete o material constituinte do reservatório.

Entretanto, quando se parte para o processo de estimativa das disponibilidades hídricas costuma-se calcular uma para as águas superficiais e outra para subterrânea. O equívoco é que ambas utilizam valores de vazões mínimas. Para a superficial emprega-se percentuais de vazões mínimas (Q_{90} , Q_{95} , $Q_{7,10}$), enquanto que para a subterrânea considera-se um percentual da reserva reguladora (que compõe as vazões mínimas) ou em alguns casos, toda a reserva reguladora somado a um percentual da reserva permanente. Logo, a adoção dessa prática, dispõe aos gestores uma disponibilidade hídrica duplicada, onde se emite as outorgas de águas superficiais sem conhecimento do que já se outorgou de águas subterrâneas, e vice-versa.

Atualmente, a maioria dos procedimentos de concessão de outorga de direito de uso da água no Brasil são feitos de forma independente, ou seja, considera-se uma disponibilidade hídrica superficial e outra subterrânea. Todavia, sabe-se que o ciclo hidrológico, seja em escala local ou regional, é interligado, onde os componentes meteorológicos, superficiais, subsuperficiais e subterrâneos são interdependentes. Soma-se a isso o fato de que a dinâmica desse ciclo independe de fronteiras geopolíticas, às quais determinam a dominialidade dos mananciais.



Figura 7.9 - Poço tubular utilizado para captação de água subterrânea no SAU (*oeste baiano).

7.1.4.1 Reservas

As reservas compreendem, em sentido amplo, a totalidade das águas mobilizáveis existentes em um sistema aquífero (Custódio & Llamas 1996). No caso de aquíferos livres, o armazenamento drenável reúne as reservas hídricas distinguidas em reguladoras ou renováveis e permanentes ou seculares (Figura 7.10).

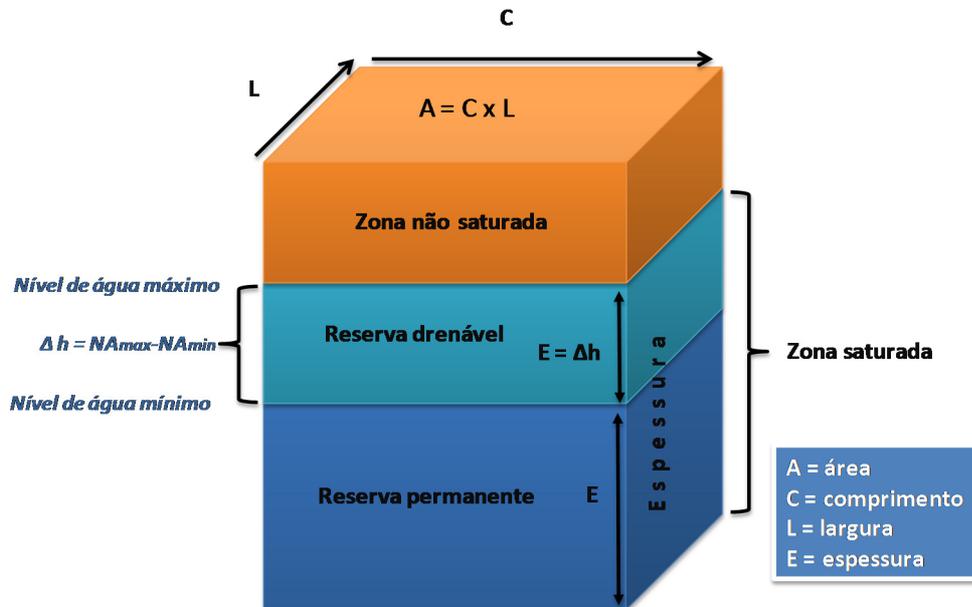


Figura 7.10 - Parâmetros utilizados no cálculo de reservas renováveis e permanentes de aquíferos sedimentares livres

As reservas renováveis correspondem à quantidade de água armazenada no aquífero e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico, corresponde à recarga sazonal. Ou seja, representa a parcela de água da chuva que efetivamente infiltra na zona saturada do aquífero e é “liberada” para os rios na forma de escoamento de base. Essas reservas são determinantes para a manutenção do escoamento de base dos rios conectados aos aquíferos livres e podem variar de um ano para o outro, dependendo das condições de precipitação atmosférica e do uso do solo.

As reservas renováveis do SAU e do SAA foram estimadas com base em dados de entrada (coeficiente de infiltração e precipitação), ou seja, conforme item anterior, equivalente à Recarga Potencial Direta (RPD).

As reservas permanentes ou seculares, por sua vez, correspondem ao volume de água acumulado no aquífero, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica. A reserva permanente (R_p) pode ser fisicamente definida pela seguinte equação:

$$R_p = A \cdot E \cdot \phi_e = V \cdot \phi_e$$

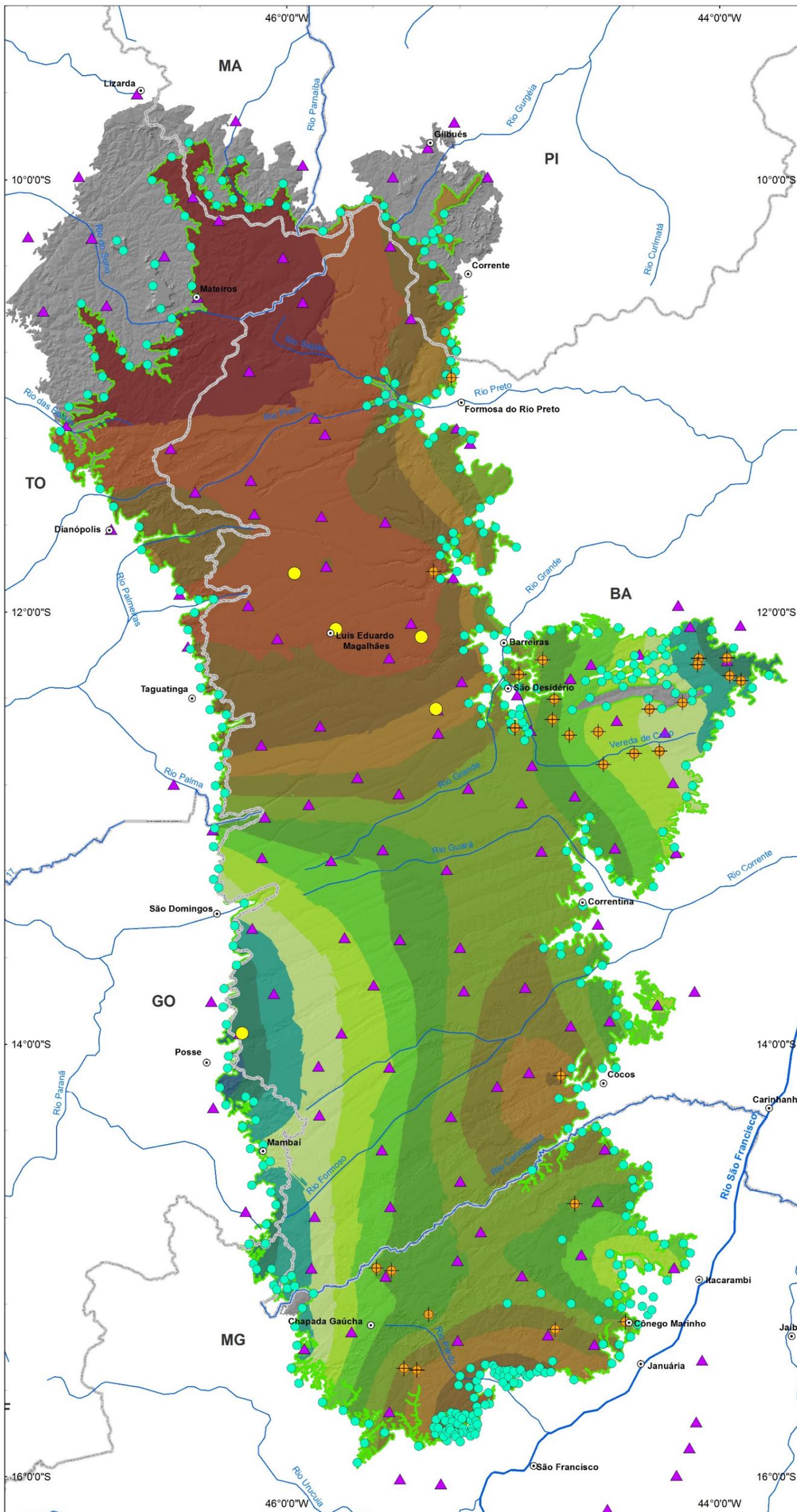
Onde: A é a área do aquífero; E representa a espessura do aquífero; ϕ_e é a porosidade eficaz do material constituinte do aquífero e V = volume rochoso saturado.

Para o cálculo do volume rochoso saturado do SAU e do SAA foram utilizados os mapas potenciométrico e de contorno estrutural do embasamento, preparados em ambiente SIG com o programa ArcGis®. Os limites dos sistemas aquíferos utilizados nestes cálculos foram os limites das áreas operacionais estabelecidos neste estudo.

O mapa de contorno estrutural do embasamento do SAU em formato *raster* (Figura 7.11) foi modelado por *krigagem* com dados de 52 SEVs distribuídas pela área, 180 pontos de controle de afloramento, 5 perfis geofísicos e 28 poços profundos que atingiram o embasamento (Grupo Bambuí). O mapa potenciométrico do SAU, já apresentado na figura 7.4 foi elaborado com dados de profundidade de nível de água de 52 SEVs e pontos de descarga representados pelas intersecções das drenagens superficiais com a topografia.

A espessura saturada do SAU foi calculada pelo método de subtração de *grids* dos mapas potenciométrico e de contorno estrutural do embasamento, o que resultou no mapa de espessura saturada do SAU, mostrado na Figura 7.12.

Tendo como base os mapas de espessura saturada, foi utilizado o aplicativo *Surface Volume* do programa ArcGis® para cálculo do volume rochoso saturado do aquífero, cujo resultado chegou a 9.656 km³ para o SAU.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- ☁ Massas d'água

Legenda

- ⊕ Poços
- Perfilagens
- Pontos de afloramento
- ▲ SEVs
- ~ Rio São Francisco
- ☁ SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Contorno estrutural do substrato (m)

- 508,9-525
- 525,1-550
- 550,1-575
- 575,1-600
- 600,1-625
- 625,01-650
- 650,1-675
- 675,01-700
- 700,01-725
- 725,01-750
- 750,01-775
- 775,01-800
- 800,01-825



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



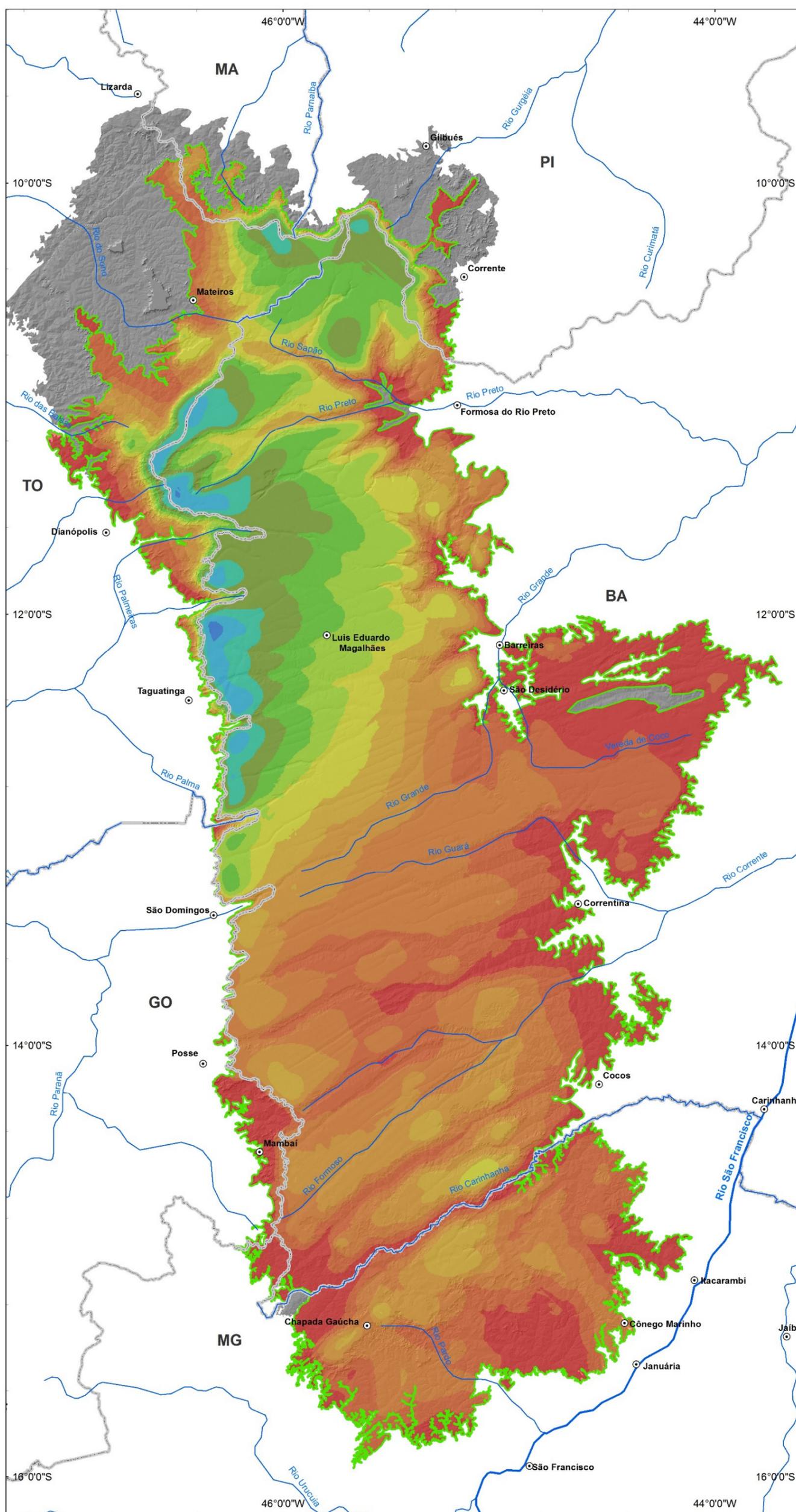
Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Mapa de contorno estrutural do embasamento do SAU

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000
 NÚMERO FIGURA: 7.11

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 km

Figura 7.11 - Mapa de contorno estrutural do embasamento do SAU.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- ~ Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Espessura saturada (m)

- 0 - 25
- 25,01-50
- 50,01-75
- 75,01-100
- 100,01-125
- 125,01-150
- 150,01-175
- 175,01-200
- 200,01-225
- 225,01-250
- 250,01-275
- 275,01-300

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGE CORPS
 WLM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do SAU e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO

Distribuição das espessuras saturadas do SAU

ESCALA NUMÉRICA	NUMERO FIGURA
1:1.900.000	7.12

ESCALA GRÁFICA

Figura 7.12 - Distribuição das espessuras saturadas do SAU.

Note-se que o volume rochoso saturado, compreendido entre o substrato do aquífero e a superfície potenciométrica, incorpora também o volume de água compreendido pela reserva reguladora, de modo que:

$$Vt = Vp + Vr$$

Onde: Vt é o volume rochoso saturado total; Vp é o volume rochoso saturado da reserva permanente; e Vr é o volume rochoso saturado da reserva reguladora.

Para estimativa da porosidade efetiva média das rochas do SAU, foram utilizados dados de teste de bombeamento de poços profundos apresentados por SRH-BA (2002). As porosidades efetivas apontadas em SRH-BA (2002) oscilaram entre 12,5% a 14,3%. Esses dados foram reinterpretados neste estudo com utilização do software *Aqtesolve Pro*, e os resultados obtidos apontaram porosidade efetiva de 12,16%, próxima aos resultados apresentados por SRH-BA (2002). Por outro lado, dados interpretados de perfis sônicos indicaram porosidades efetivas variando de 20% a 25%, bem maiores do que as calculadas em testes de bombeamento.

Admitindo-se porosidade efetiva média de 14% para os sedimentos do SAU, a totalidade das reservas hídricas (reservas reguladoras + reservas permanentes) alcança aproximadamente 1.352 km³ de água. Subtraindo-se deste volume a quantidade de água correspondente à reserva reguladora, tem-se a reserva permanente, calculada em cerca de 1.328 km³. A distribuição das reservas hídricas do SAU obtidas com os dois métodos é resumida no Quadro 7.6 a seguir.

QUADRO 7.6 - RESERVAS HÍDRICAS DO SAU

<i>Área operacional SAU (Km²)</i>	<i>Volume rochoso saturado (km³)</i>	<i>Recarga Potencial Direta (Km³/ano)</i>	<i>Reserva permanente (km³)</i>	<i>Reservas totais (km³)</i>
109.531	9.656	24,19	1.327,97	1.351,84

7.1.4.2 Disponibilidades

Existem vários termos e conceitos associados à quantidade de água subterrânea disponível, e muita controvérsia sobre suas definições (DWR, 2003). Algumas destes incluem capacidade de armazenamento subterrâneo, capacidade de armazenamento utilizável, balanço hídrico, variações de armazenamento, superexploração e vazão segura (DWR, 2003).

A definição de disponibilidade hídrica admite diferentes interpretações. Segundo Mace *et al.* (2001), a quantidade de água disponível para uso armazenada nos aquíferos é definida como disponibilidade hídrica subterrânea. Esse conceito discrimina a parcela de água efetivamente disponível para uso das reservas hídricas totais. Para ANA (2004), a definição de disponibilidade hídrica admite diferentes interpretações e está ligada às finalidades de planejamento e gerenciamento das bacias.

A disponibilidade hídrica proposta pela ANA, baseada em conceitos sustentáveis, conforme disposto em ANA (2013), propõe uma visão mais sustentável e integrada, e de certa forma, mais conservadora. Considera a disponibilidade hídrica total como uma parcela da Recarga Potencial Direta (RPD). Esse percentual, denominado de Coeficiente de Sustentabilidade (Cs), aplicado à RPD resulta na Reserva Explotável (RE) que equivale à disponibilidade hídrica subterrânea total, conforme relação abaixo:

$$RPE = Cs \cdot RPD$$

Onde: RPE é a Reserva Potencial Explotável, Cs é o coeficiente de sustentabilidade e RPD é a Recarga Potencial Direta.

O coeficiente de sustentabilidade (Cs) é um percentual máximo recomendado para se explorar da Recarga Potencial Direta, com vistas a evitar efeitos adversos nos aquíferos e redução significativa das vazões de base dos rios a eles interconectados. A indicação desse percentual é evitar o comprometimento da disponibilidade hídrica superficial desses corpos d'água nos períodos de estiagem com o uso indiscriminado da água subterrânea, haja vista que a disponibilidade hídrica superficial é baseada em vazões mínimas.

O valor do coeficiente de sustentabilidade varia entre 0,1 e 1,0, sendo atribuído por aquífero em função de suas características intrínsecas, especialmente sua contribuição por meio do fluxo de base no escoamento superficial total de um rio. De forma geral, para aquíferos que contribuem com percentuais mais elevados no escoamento superficial total recomenda-se valores de Cs relativamente inferiores àqueles onde essa contribuição subterrânea é menor.

Como o Cs é um valor estimado com base na contribuição do aquífero para as vazões dos rios, a relação Q_{90}/Q_{50} , constitui bom parâmetro indicativo para o estabelecimento desse coeficiente, uma vez que mostra a participação do escoamento subterrâneo no escoamento superficial.

Considerando que parte do fluxo de base já está sendo retirado através das vazões mínimas referenciais para a outorga de águas superficiais (excluídas as regularizações promovidas por reservatórios), sugere-se que o Cs não exceda a 0,4, nos cenários mais favoráveis. Nos aquíferos livres, com transmissividade elevada, como no caso do SAU, onde a vazão de base representa parcela significativa do escoamento superficial, é sugerido Cs de 0,2, de forma a manter inicialmente, pelo menos 80% do escoamento de base disponível como vazão superficial. Essa parcela terá que comportar o volume outorgável superficial e a vazão remanescente, onde devem estar inclusos a vazão ambiental (ecológica) e o volume a ser entregue a outros rios estaduais e/ou federais estabelecidos nos marcos regulatórios.

A relação Q_{90}/Q_{50} indica uma estimativa do percentual da participação do escoamento subterrâneo na vazão superficial média. Desta forma nos rios onde essa relação é alta, a partir de 60 ou 70%, há uma indicação clara de que se há uma exploração de parcela significativa da recarga potencial direta como água subterrânea, o restante poderá ser insuficiente para águas superficiais, nos períodos de estiagem.

Para o Sistema Aquífero Urucuia, portanto, adotou-se o Cs de 0,2, baseando-se numa relação Q_{90}/Q_{50} média ponderada pelas do SAU de 0,76, obtida dos seis postos fluviométricos avaliados na hidrologia. Assim, o valor da Reserva Potencial Explotável correspondente à disponibilidade hídrica subterrânea total do SAU, segundo o método utilizado em ANA (2013) é de 4,84 Km³/ano, conforme equação abaixo.

$$RPE = 0,2 \cdot 24,19$$

$$RPE = 4,84 \text{ Km}^3/\text{ano}$$

O valor obtido da Reserva Potencial Explotável (4,84 Km³/ano) é aquele que a ANA recomenda que seja efetivamente considerado como a quantidade de água subterrânea disponível para uso no SAU, considerando como adequado o coeficiente de sustentabilidade de 0,2. Desse valor deve-se diminuir o montante referente aos usos atuais.

7.1.5 Potencialidades do Sistema Aquífero Urucuia (Zoneamento das Vazões Explotáveis)

O conceito de potencialidade é aqui definido como na concepção de DAEE (2005), compreendendo a vazão explorável ou recomendada, definida como “aquela que pode ser extraída de forma sustentável por longos períodos e com rebaixamentos moderados da espessura saturada”.

Um dos parâmetros mais comuns de avaliação de potencialidades é a capacidade específica de poços, a qual fornece uma ideia do rendimento do poço (vazão extraída por metro de rebaixamento). Todavia, a capacidade específica é um parâmetro hidrodinâmico que tem o inconveniente de ser fortemente influenciado pelas características construtivas do poço, refletindo também, em sua grandeza, as perdas de carga devidas ao dano de formação exigindo-se certa dose de cautela na sua utilização como parâmetro de avaliação (Paula & Silva, 2003).

Um método prático para estimar potencialidades com base em parâmetros hidrodinâmicos do aquífero foi utilizado pelo DAEE (2005), no qual a estimativa da vazão explorável é função da transmissividade, porosidade efetiva, raio do poço e do rebaixamento máximo admitido, de acordo com a equação abaixo, adaptada de Cooper & Jacob (1946):

$$Q = \frac{s \cdot 4\pi \cdot T}{\ln(2,25 \cdot T \cdot t / r^2 \cdot S_y)}$$

Onde: Q= vazão de extração (m³/h); s = rebaixamento admitido para o poço (m); T= transmissividade (m²/d); S_y = porosidade efetiva (%); r = raio do poço (m) e t = tempo de bombeamento (d).

Devido à escassez e distribuição irregular de dados hidrodinâmicos disponíveis, foram estimados para o SAU valores únicos de S_y e de K, com base em valores representativos conhecidos. Para S_y foi adotado o valor de 14% e para K 3,5 m/dia.

O raio do poço e o tempo de bombeamento são parâmetros arbitrados; e o rebaixamento e a transmissividade são as variáveis independentes da equação de Cooper & Jacob (1946), que condicionam a estimativa das vazões máximas exploráveis.

O raio do poço foi fixado em 0,1 m, neste estudo, para efeitos práticos. A vazão é dependente da função logarítmica do raio; significa dizer que, por exemplo, a duplicação do diâmetro do poço proporciona um acréscimo de vazão inferior a 10%.

O tempo de bombeamento contínuo foi assumido em 10 anos (3.650 dias). Um acréscimo do período de bombeamento contínuo resulta em diminuição da vazão, em longo prazo.

O rebaixamento máximo admitido foi de 20% da espessura saturada para o SAU, para período de 10 anos de exploração contínua. Esse rebaixamento pode ser considerado moderado para aquíferos livres e adequado ao conceito de potencialidade definido em DAEE (2005).

Fixados alguns termos, a equação modificada de Cooper & Jacob (1946) pode ser expressa da forma abaixo, na qual as variáveis independentes são somente T (transmissividade) e s (rebaixamento):

$$Q = \frac{s \cdot T \cdot 12,56}{\ln T + 15,58}$$

Como as potencialidades variam de um ponto a outro em função da espessura saturada do aquífero, e esta, por sua vez, regula a transmissividade, os procedimentos para elaboração do mapa de distribuição das vazões potenciais, em ambiente ArcGis, foram:

- ✓ Elaboração de mapa de transmissividades do SAU: multiplicando-se o *grid* de espessura saturada (E) pelo valor da condutividade hidráulica (K) assumida no estudo, de modo que o resultado expressa a distribuição da transmissividade (T), segundo a equação a seguir:

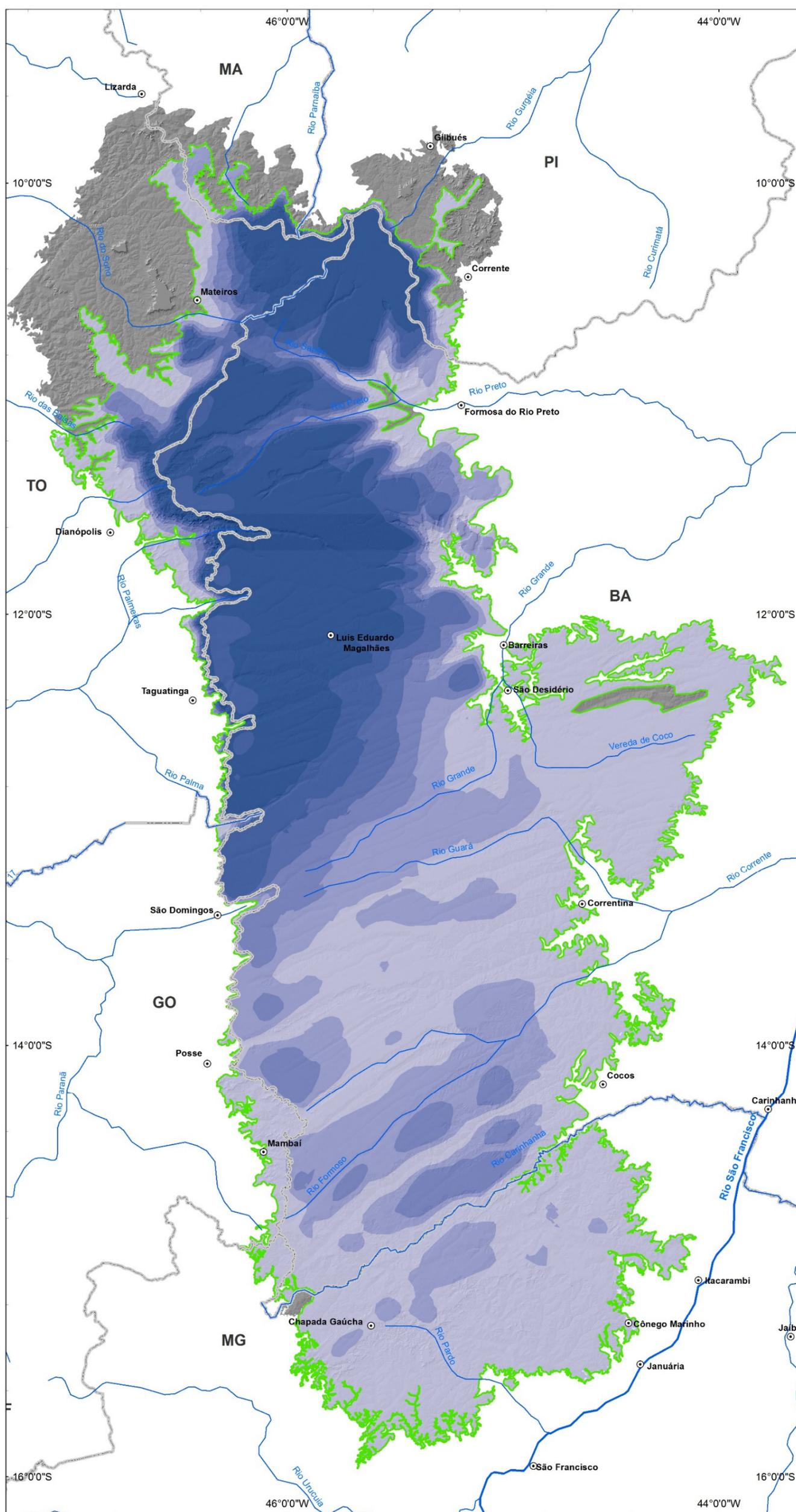
$$T = K \cdot E$$

- ✓ Elaboração de mapa correspondente a 20% da espessura saturada para o SAU: multiplicando-se o *grid* de espessura saturada (E) por 0,2, obtendo-se *grid* correspondente a 20% da espessura saturada para o SAU. Este *grid* representa o rebaixamento (termo s da equação) máximo admitido neste estudo e varia, proporcionalmente, de acordo com a espessura saturada total.
- ✓ Elaboração de mapa de distribuição de vazões exploráveis potenciais: utilizando-se operações de *grids* e operações matemáticas para solução da equação 2. Inicialmente, foi elaborado o *grid* representativo do dividendo e o *grid* representativo do divisor da equação 2 em ambiente GIS. Em seguida, realizou-se operação de divisão entre os *grids* e geraram-se os mapas de distribuição de vazões potenciais do SAU (Figura 7.13).

Conforme evidenciado no mapa da figura 7.13 as vazões de poços no SAU podem alcançar de 100 a 600 m³/h. Obviamente vazões menores podem ser obtidas de poços mais rasos e em muitos casos a perfuração de poços segue configurações necessárias para o uso requerido. Normalmente poços profundos (>200 metros) e com grandes diâmetros (14 pol.) atendem os grandes usuários, representados pelos irrigantes, os quais extraem do aquífero altas vazões,

normalmente de uma bateria de poços em uma mesma propriedade. Enquanto que, os poços mais rasos e com baixas vazões comumente atendem usuários comuns que utilizam a água para o abastecimento humano.

A existência de um universo maior e melhor distribuído dos parâmetros hidrodinâmicos poderia representar melhor as variações deste parâmetro em função das características litológicas dos aquíferos. Todavia, mesmo na ausência dessas informações, os mapas elaborados segundo o método apresentado retratam de modo coerente essas potencialidades, pois não incorporam parâmetros de poços fortemente influenciados por aspectos construtivos, como, por exemplo, a capacidade específica.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Potencialidades

Vazão (m³/h)

- 100
- 200
- 300
- 400
- 500
- 600

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do SAU e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO	
Mapa de potencialidade (vazões explotáveis) do SAU	
ESCALA NUMÉRICA	NÚMERO FIGURA
1:1.900.000	7.13
ESCALA GRÁFICA	

Figura 7.13 - Mapa de potencialidades (vazões explotáveis) do SAU.

7.1.6 Modelagem de Fluxo do SAU

O objetivo principal da simulação realizada foi elaborar um modelo simplificado da dinâmica de fluxo das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucua. Essa modelagem foi feita apenas no SAU haja vista a quantidade de dados necessária para sua realização. Portanto, essa modelagem não foi efetuada para o Sistema Aquífero Areado.

As condições de contorno, presentes em todos os modelos matemáticos, são elementos essenciais à solução dos mesmos. Matematicamente, como explicitado por Franke *et al.* (1987), as condições de contorno são de três tipos principais: contorno de carga hidráulica especificada ou carga hidráulica constante (Tipo I); condição de contorno de fluxo especificado (Tipo II) e condição de fluxo dependente da carga (Tipo III).

- ✓ Tipo I - Contorno de carga hidráulica especificada ou carga hidráulica constante (condição de Dirichlet) (Figura 7.14), que pode ser matematicamente representado pela expressão:

$$h(x,y,z,t) \text{ é especificado}$$

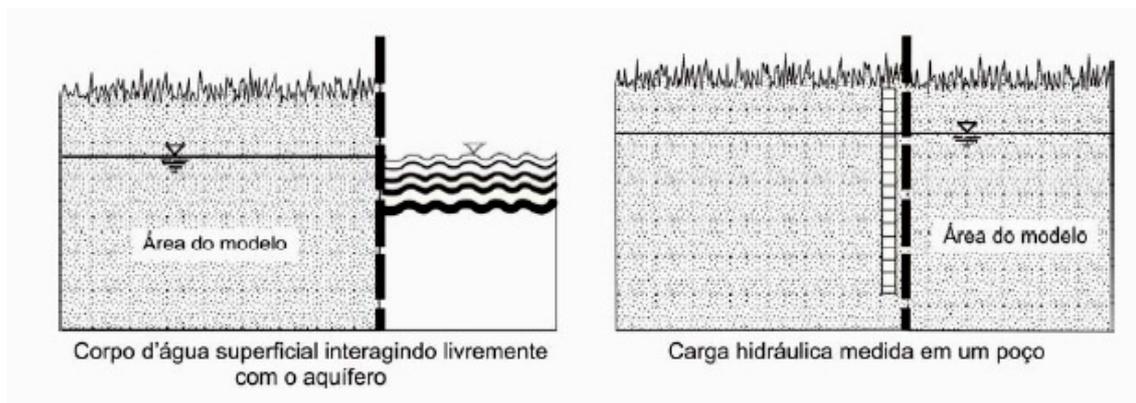


Figura 7.14 - Exemplos de condição de carga hidráulica especificada (primeiro tipo)

Neste tipo de contorno, a carga hidráulica é conhecida em algumas regiões do domínio simulado e, portanto, serve como referência para a solução do modelo. Reilly *et al.* (1987) exemplificam tais condições de contorno por rios e lagos que possuam valores de carga hidráulica conhecida e ligação direta com o aquífero

- ✓ Tipo II - Condição de contorno de fluxo especificado (Condição de Neumann), expressa matematicamente por:

$$\frac{dh(x, y, z, t)}{dn} = \text{especificado}$$

Onde: $dh(x,y,z,t)$ é a variação elementar tridimensional e temporal de carga hidráulica, e dn é a variação elementar de distância perpendicular à direção de fluxo.

O fluxo especificado pode ser nulo ou não. A condição de fluxo nulo é aplicável quando existe um contorno impermeável, uma linha de simetria, uma linha de fluxo, ou seja, onde inexistir fluxo transversal a este contorno (Figura 7.15).

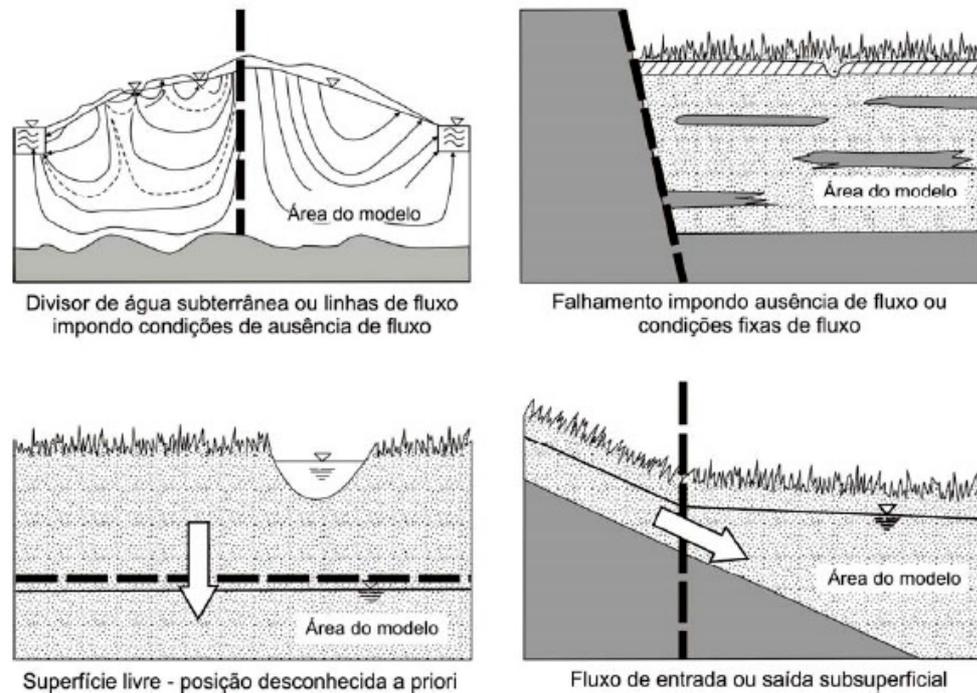


Figura 7.15 - Exemplos de condição de fluxo especificado (Tipo II ou Neumann)

É comum que se use este tipo de condição de contorno em simulações de dimensões reduzidas, situação onde não se conhece a extensão real do aquífero, sendo a forma deste limite delineada a partir de uma linha de fluxo obtida da potencimetrica local.

Reilly *et al.* (1987) exemplificam lagos e rios como tipos de condições de contorno de fluxo especificado (não nulo), desde que estes tenham sua interação com o aquífero bem conhecida, como representada a seguir:

$$q = f(x, y, z, t)$$

✓ Tipo III - Condição de fluxo dependente da carga (condição de Cauchy) (Figura 7.16), expressa pela equação:

$$\frac{dh}{dn} + ch = c$$

Um exemplo comumente usado para este tipo de contorno é aquele no qual existe uma camada semipermeável separando dois aquíferos ou um aquífero e um corpo de água superficial.

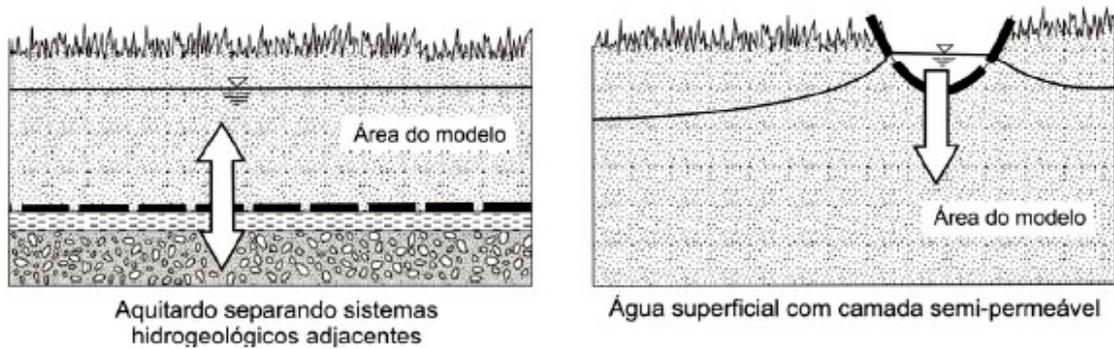


Figura 7.16 - Condição de contorno de fluxo dependente (Tipo III ou Cauchy)

O fluxo que passa deste corpo aquoso sobrejacente para o aquífero, através da camada semipermeável é expressa pela equação de Darcy:

$$q = K' \cdot \frac{(H' - h')}{b'}$$

Onde: q é o fluxo específico de água que atravessa a camada semipermeável em virtude da diferença de carga hidráulica (m/s); K' é a condutividade hidráulica da camada semiconfinada (m/s); $H' - h'$ é a diferença de carga entre o aquífero livre e o semiconfinado (m); b' é a espessura saturada da camada semiconfinante (m).

Desta forma, a perda de carga no aquífero induz a um menor fluxo através da camada semiconfinante e, na condição oposta, seu incremento leva a um aumento na taxa de fluxo, numa relação linear (Franke *et al.*, 1987).

O processo de escolha do código computacional (*software*) é realizado de acordo com o modelo hidrogeológico conceitual estabelecido, optando-se por aquele que seja mais adequado à complexidade do problema. O software utilizado neste trabalho foi o *Visual MODFLOW*, que é uma interface gráfica do *MODFLOW*, desenvolvido pela empresa canadense Waterloo Hydrogeologic, Inc., que opera em Plataforma *WINDOWS®*.

O *MODFLOW* utiliza o método das Diferenças Finitas (MDF), que se baseia na aproximação de equações diferenciais parciais, pela discretização linear nas mudanças nestes intervalos discretos de espaço e tempo. Cada uma destas equações possui uma incógnita a ser solucionada.

Em modelos de fluxo de água subterrânea essas incógnitas são representadas por pontos discretos no domínio simulado, denominado *nó*. Os nós, em problemas hidrogeológicos, normalmente representam a carga hidráulica, e os valores atribuídos a estes são considerados constantes em toda região que os mesmos representam. Essas regiões, por sua vez, são constituídas por células ou quadrículas delimitadas por uma malha previamente estabelecida, que pode ter espaçamento constante ou irregular entre as linhas. As malhas para o MDF podem ser com nó centrado no bloco (*centered-block grid*), ou com nó situado no cruzamento entre as linhas (*no-centered-block grid*) (Figura 7.17).

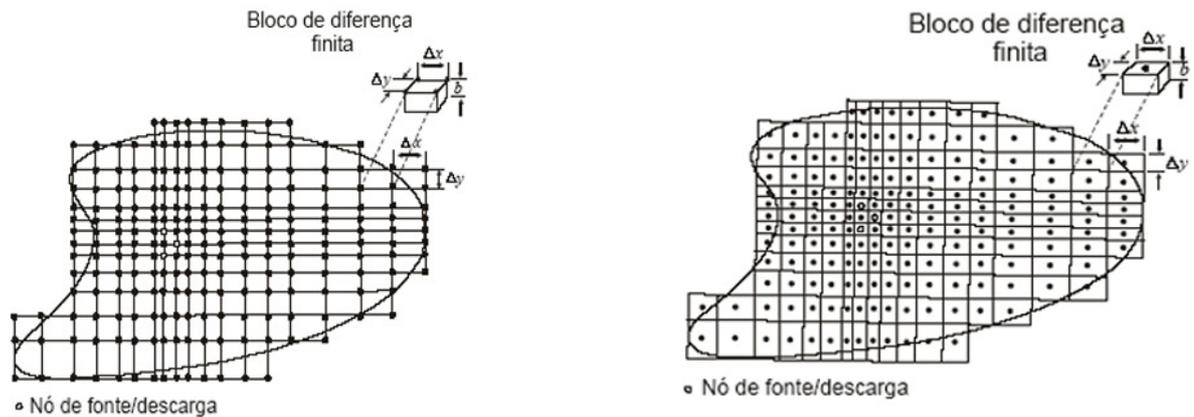


Figura 7.17 - (Esquerda) Grid com nó não centrado, caso em que os nós se encontram nas intersecções das células. (Direita) Grid de nó centrado, caso em que os nós se posicionam na porção central da célula (Wang & Anderson, 1982)

Para desenvolvimento desta simulação, foram utilizados os seguintes dados:

- ✓ Mapa de contorno estrutural do embasamento do SAU;
- ✓ Componentes do balanço hídrico e recarga.
- ✓ Modelo Digital de Terreno;
- ✓ Parâmetros hidráulicos médios apresentados em estudos anteriores na área do SAU;
- ✓ Modelo hidrogeológico conceitual;

Para a simulação, foram adotadas as seguintes premissas:

- ✓ Homogeneidade litológica e, portanto, hidráulica em toda a bacia. A predominância dos litotipos arenosos foi atestada pelos trabalhos de campo, sondagens elétricas, descrição de poços de trabalhos anteriores;
- ✓ Conectividade hidráulica nula ou pouco expressiva com as unidades subjacentes e mais antigas, admitindo-se a existência de um grande contraste nos valores de condutividade hidráulica entre os litotipos que compõe o SAU e as unidades subjacentes mais antigas. Neste contexto, é admitido que todo o conjunto de unidades situadas abaixo do aquífero é impermeável, representado, portanto, por uma condição de fluxo nulo. Essa premissa foi utilizada apenas para fins de modelagem, haja vista que no momento da modelagem não se dispunha de dados para modelar, por exemplo, a perda de água do SAU ou recarga para os aquíferos subjacentes, como o Bambuí, por exemplo;
- ✓ A descarga da água subterrânea se direciona exclusivamente para as drenagens que cortam o aquífero. Neste caso, admite-se que o SAU é segmentado em diversos sistemas de fluxos locais, cujos limites coincidem com os limites das bacias hidrogeológicas;
- ✓ O aquífero é do tipo livre em toda sua extensão, inexistindo camadas confinantes regionais na escala de trabalho adotada. Para esta premissa também não foi possível considerar as camadas de arenitos silicificadas que funcionam em algumas regiões do SAU como

semiconfinantes, porque não tínhamos dados precisos de sua localização, continuidade e características hidráulicas;

- ✓ Em virtude de sua posição topográfica mais elevada, na forma de um platô destacado, é admitida a ausência de conectividade lateral com outras unidades e, portanto, os limites do SAU são representados por contornos de não-fluxo, admitindo-se que o fluxo é paralelo à borda desse sistema aquífero em suas porções limítrofes;
- ✓ Como apontado nos trabalhos de Anderson & Wossner (1992), Freeze e Whitherspoon (1967), dentre outros, se existe uma diferença superior a duas ordens de grandeza em relação aos valores de condutividade hidráulica, o fluxo na base pode ser considerado paralelo a este contato, justificando a adoção de um contorno impermeável. Uma vez que as litologias situadas na base do Urucuia são representadas, majoritariamente, por calcários, filitos e quartzitos, litologias estas menos permeáveis que os arenitos do Aquífero Urucuia, pode-se afirmar que o padrão de fluxo de maneira generalizada é coincidente com o contato desse aquífero com as unidades subjacentes;
- ✓ A malha de drenagens presentes na área de abrangência do Sistema Aquífero Urucuia se caracteriza por seu elevado nível de dissecação. Em face deste contexto, tais drenagens representam as principais rotas de descarga do aquífero Urucuia.
- ✓ Em razão das premissas adotadas, considera-se que a transferência de água do Urucuia para o Bambuí é bastante restrita e o volume transferido por drenança é bastante reduzido e negligenciável na escala de trabalho adotada. Por outro lado, a contribuição de água do SAU para os Rios São Francisco e Tocantins é empreendida pelo escoamento de base dos tributários destes rios.

A Figura 7.18 ilustra, sinteticamente, o Modelo Conceitual acima descrito na forma de uma seção de direção N-S.

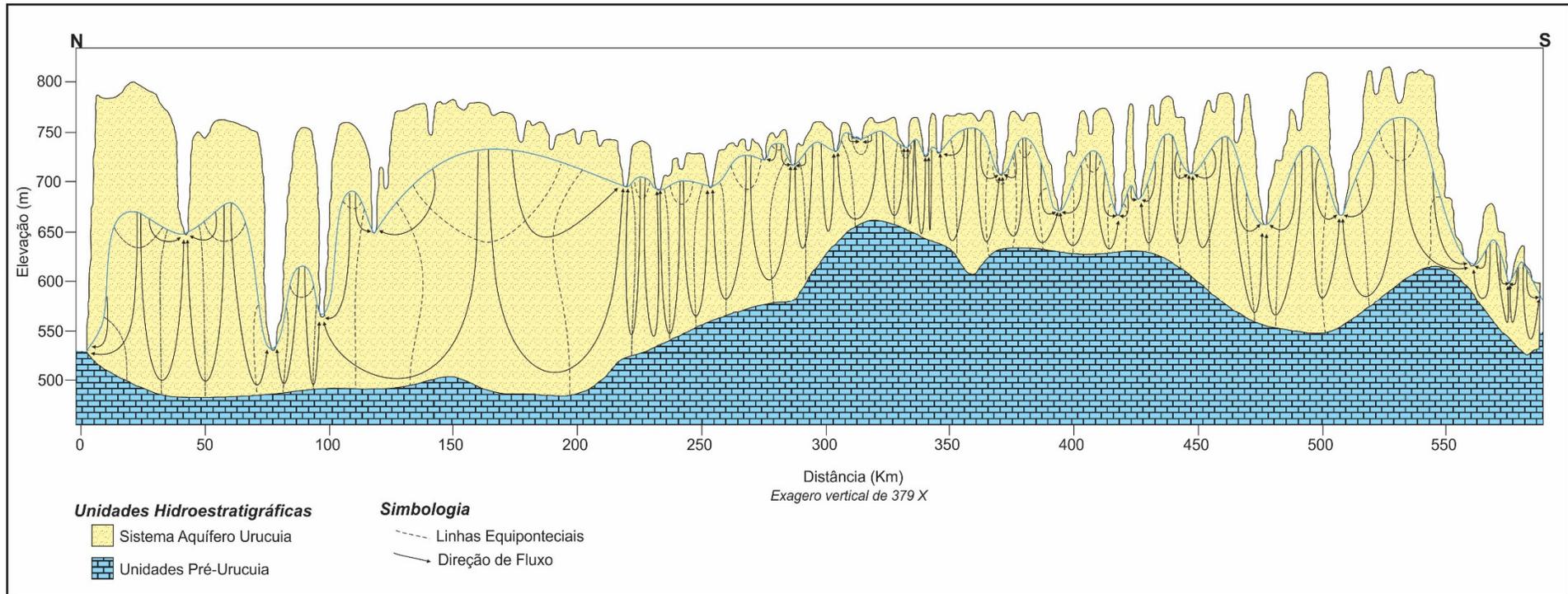


Figura 7.18 - Ilustração esquemática em seção do modelo conceitual concebido

A discretização do domínio do modelo foi realizada com vistas à representação detalhada do fluxo dentro da escala adotada de trabalho. Deste modo, o modelo foi discretizado em uma malha de 500 linhas por 400 colunas e 2 camadas, o que corresponde a 400.000 células, das quais 175.250 estão ativas (Figura 7.19). As células do modelo, com dimensões regulares, têm aproximadamente 1.245 m de largura por 1.375 m de altura.

O topo da primeira camada do modelo foi gerado a partir de informações do modelo digital do terreno obtido do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*).

A superfície correspondente à base impermeável do modelo, representada pelo contato da base do Urucuia, foi gerada a partir da interpolação dos seguintes dados:

- a) Pontos conhecidos do contato entre o Sistema Aquífero Urucuia e as unidades mais antigas.
- b) Perfis descritivos de poços.
- c) Informações obtidas de SEVs (Sondagem Elétrica Vertical).

A base da primeira camada foi estabelecida arbitrariamente, não obedecendo nenhum critério hidroestratigráfico, uma vez que é adotado o princípio de homogeneidade hidráulica no modelo. A Figura 7.20 ilustra seções N-S e E-W, aproximadamente na porção mediana do modelo, ilustrando os limites das duas camadas do modelo. A adoção de uma segunda camada visou identificar a existência de diferenças nos padrões de fluxo em porções profundas do SAU, bem como avaliar se o escoamento de base possuía contribuição apenas da porção superficial deste sistema aquífero ou existiria a contribuição de porções profundas.

Para as simulações realizadas nesta etapa de trabalho foi adotado um valor único de condutividade hidráulica para todo o modelo, de $6,0 \times 10^{-5}$ m/s, que representa um valor médio ponderado dos valores descritos por vários autores (Quadro 7.7).

QUADRO 7.7 - VALORES DE K DETERMINADOS PARA O SAU

<i>Autor</i>	<i>Valores de k (m/s)</i>	
	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
Schuster et al. (2002)	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$
Nascimento (2003)	$4,05 \times 10^{-3}$	$4,11 \times 10^{-3}$
Gaspar (2006)	$2,40 \times 10^{-7}$	$6,40 \times 10^{-5}$
CPRM & UFBA (2007)	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-4}$

As condições de contorno do modelo impuseram condição de fluxo nulo nos limites do sistema aquífero, considerando que o SAU não possui conectividade hidráulica com as unidades litoestratigráficas com as quais possui contato, e a premissa de que toda a saída de água se dá exclusivamente pelos inúmeros rios que cortam o aquífero. Para representação dos rios foi empregado o pacote *river*. A Figura 7.21 ilustra a distribuição destas condições de contorno no interior do modelo.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- ~ Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU
- Malha de diferenças finitas do modelo**
- Células ativas
- Células inativas



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do SAU e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Malha de diferenças finitas do modelo

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000 NÚMERO FIGURA: 7.19

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 km

Figura 7.19 - Malha de diferenças finitas do modelo

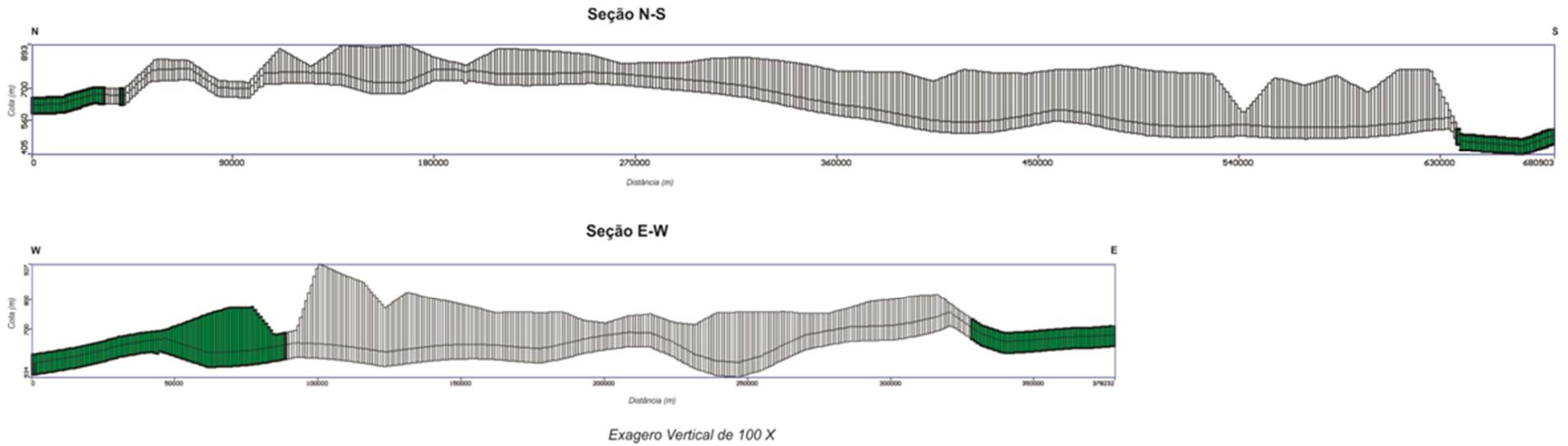
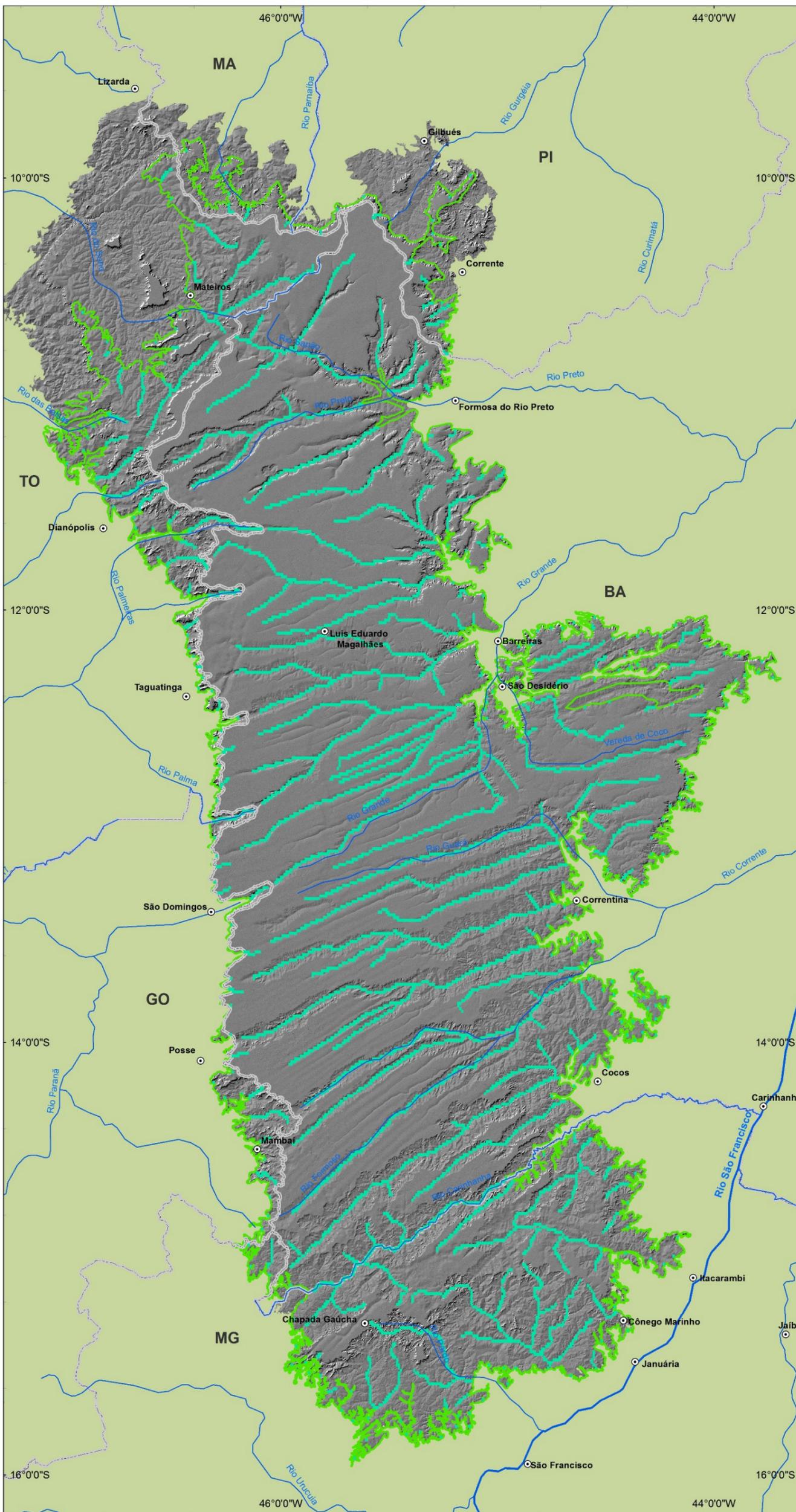


Figura 7.20 - Seções com direções N-S e E-W mostrando a discretização vertical do modelo em 2 camadas.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- - - Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU
- Condições de contorno do modelo**
- Inativas
- Condições de Contorno Rios



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuiá e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada		
TÍTULO Distribuição das condições de contorno do modelo		
ESCALA NUMÉRICA 1:1.900.000	NÚMERO FIGURA 7.21	
ESCALA GRÁFICA 0 5 10 20 30 40 km		

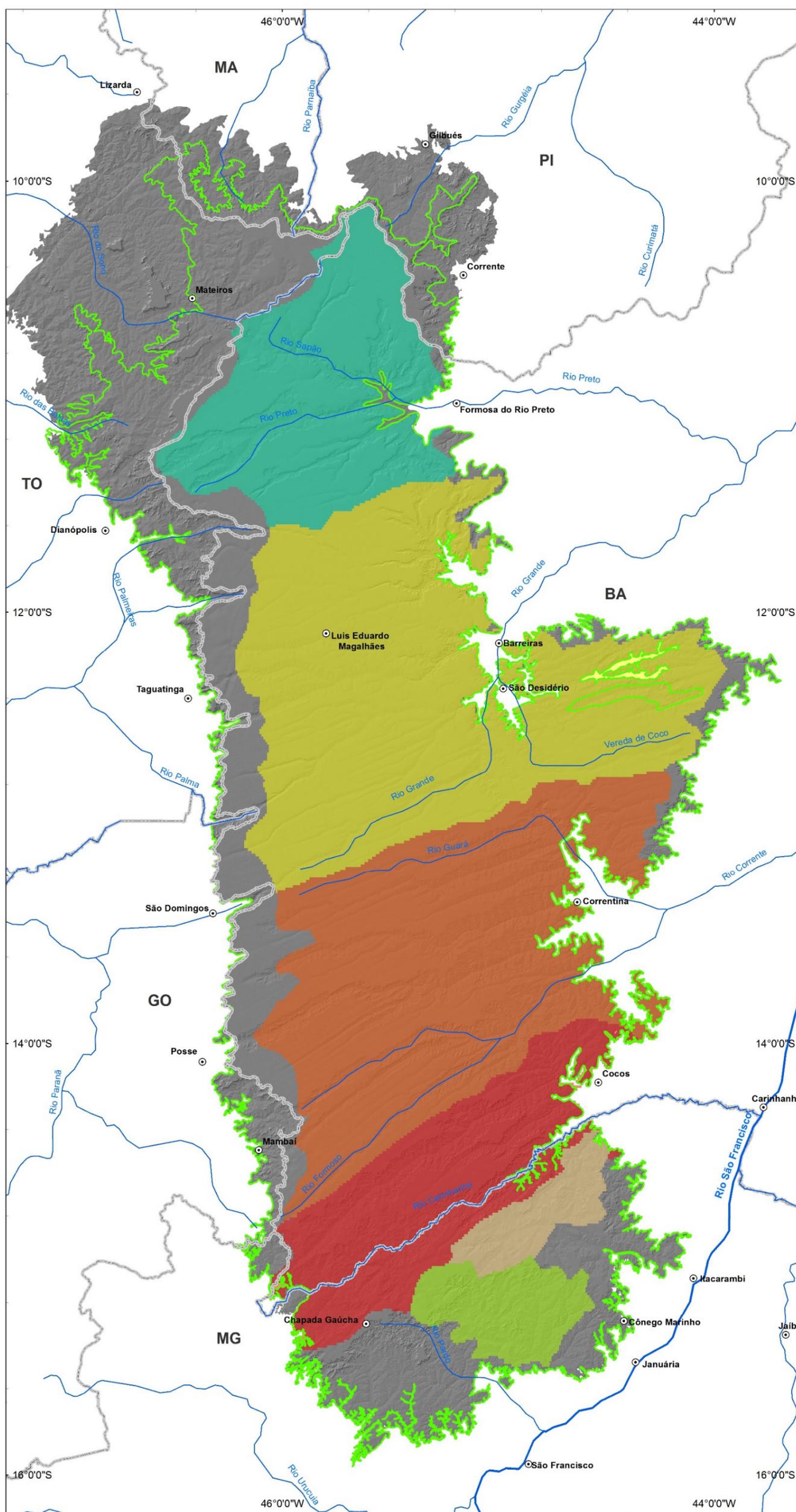
Figura 7.21 - Distribuição das condições de contorno do modelo.

Para entendimento da circulação de água subterrânea, o modelo foi segmentado em sub-bacias, onde foram efetuados os cálculos de balanço de fluxo. As zonas para balanço de fluxo foram definidas com base nos limites das bacias hidrogeológicas (Figura 7.22).

O cálculo deste balanço foi realizado pelo aplicativo *Zone Budget* (Harbaugh, 1990), que registra o fluxo de entrada e saída de água em cada célula dentro das zonas de balanço e calcula os volumes de água que saem e entram em cada uma destas zonas.

Em regime permanente (*steady state*), o balanço de fluxo pressupõe uma condição de equilíbrio, onde o volume de água que entra no modelo é equivalente ao volume de água que sai. Em tal condição, não são consideradas variações no armazenamento (DS) em virtude das variações sazonais de recarga.

As simulações realizadas permitiram calcular o balanço hídrico para cada sub-bacia delimitada no modelo e, deste modo, quantificar o volume de água que sai pelas condições de contorno Rios e representa fisicamente o escoamento de base. A Figura 7.23 exemplifica o balanço hídrico calculado para a sub-bacia do rio Corrente, onde constam os valores de entrada de água pela recarga e influxo de sub-bacias vizinhas, bem como a saída pela descarga nos rios e fluxo para as sub-bacias circundantes.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Zonas de balanço hídrico

- Rio Carinhanha
- Rio Corrente
- Rio Coxá (Rio Carinhanha)
- Rio Grande
- Rio Pandeiros
- Rio Preto (Rio Grande)

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGE CORPS
 WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuiá e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Distribuição das zonas de balanço hídrico do modelo

ESCALA NUMÉRICA 1:1.900.000	NUMERO FIGURA 7.22
--------------------------------	-----------------------

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 km

Figura 7.22 - Distribuição das zonas de balanço hídrico do modelo.

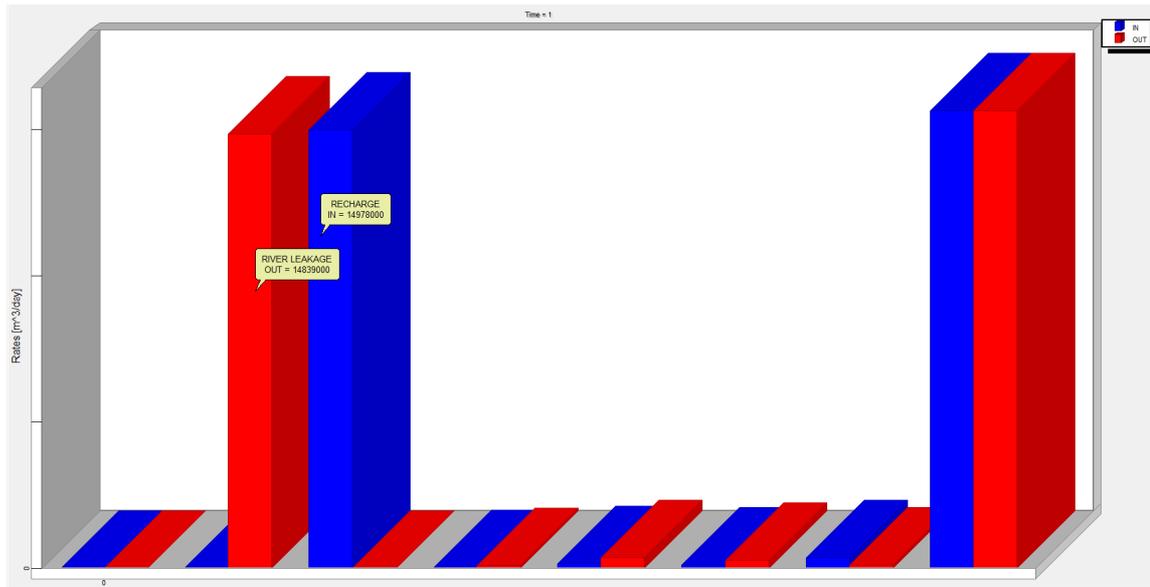


Figura 7.23 - Gráfico com o balanço de fluxo para o Rio Corrente

A calibração do modelo foi empreendida pelo ajuste nos valores de recarga em cada sub-bacia até que as saídas de água pelas condições de contorno rios se tornassem valores próximo aos escoamentos de base de uma das sub-bacias analisadas. O quadro a seguir apresenta comparação entre os resultados do escoamento de base calculados nos postos fluviométricos e os valores de escoamento de base calculados pela simulação. Os resultados obtidos são classificados como satisfatórios, uma vez que os erros são inferiores a 10% (Quadro 7.8).

QUADRO 7.8 - RESULTADO DO CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO PARA CADA BACIA

Zona de Balanço	Escoamento de base real (m³/dia)	Escoamento de base calculado (m³/dia)	Erro (%)
Rio Pandeiros	1.701.216,00	1.675.700,00	1,52
Rio Carinhanha	9.281.269,10	8.608.700,00	7,81
Rio Coxá (Carinhanha)	956.923,40	979.210,00	-2,28
Rio Corrente	15.046.496,43	14.830.000,00	1,46
Rio Grande	14.262.420,12	15.054.000,00	-5,26
Rio Preto (Grande)	7.681.023,91	7.537.800,00	1,90

A Figura 7.24 revela forte correlação entre as informações de escoamento de base real e calculadas pela simulação, que pode ser expressa pelo elevado valor de coeficiente de determinação (R^2), igual a 0,9986. Tal fato indica que o modelo gerado é representativo frente às condições reais e os valores de recarga adotados permitem um entendimento em grau satisfatório do SAU.

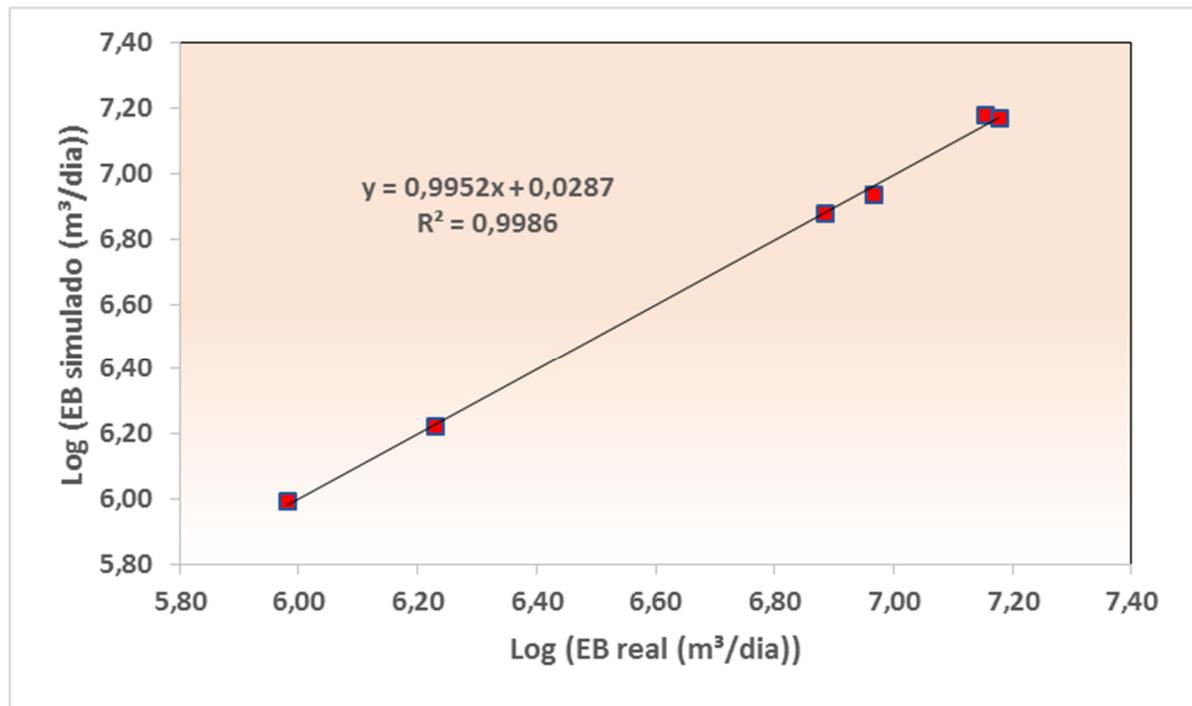


Figura 7.24 - Gráfico de correlação entre valores normalizados de escoamento de base real e simulado

Os valores de recarga obtidos pela calibração do modelo estão listados no Quadro 7.9. Os valores encontrados se situam entre o valor mínimo de 130 mm/ano na sub-bacia do rio Coxá e máximo de 230 mm/ano na sub-bacia do rio Corrente. A proporção da recarga em relação ao montante total anual de precipitação situa-se entre 12% na sub-bacia do rio Coxá e 21% na sub-bacia do rio Corrente.

QUADRO 7.9 - VALORES DE RECARGA OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO

Zona de Balanço	Recarga (mm/ano)	Recarga/Precipitação
Rio Pandeiros	160	0,15
Rio Carinhanha	200	0,19
Rio Coxá (Carinhanha)	130	0,12
Rio Corrente	230	0,21
Rio Grande	190	0,15
Rio Preto (Grande)	220	0,18

A contribuição do escoamento de base para as drenagens do SAU não provém exclusivamente das porções mais rasas deste sistema aquífero. Os resultados aqui apresentados sugerem que porções profundas do aquífero descarregam também para a rede de drenagens.

As Figuras 7.25 e 7.26 ilustram, respectivamente, a distribuição de cargas hidráulicas geradas pela simulação para a primeira e segunda camada. A comparação das duas figuras indica uma forte similaridade entre ambas, o que indica que as condições de contorno impostas na primeira camada exercem controle na conformação potenciométrica da segunda camada. Os valores de carga hidráulica são concordantes com a conformação topográfica do SAU.

Os resultados apresentados atestam que o modelo de fluxo concebido se adéqua às condições de contorno estabelecidas e pode subsidiar novas avaliações com o ingresso de informações adicionais. O balanço de fluxo apresentado permitiu simular, com razoável precisão em função da escala de trabalho e da quantidade de dados disponíveis, o volume de água que ingressa nas principais sub-bacias drenadas pelo SAU que contribuem com a vazão do Rio São Francisco. Todavia, em virtude da incipiência ou ausência de informações relacionadas às demais sub-bacias, não foi possível simular a contribuição do SAU para o rio Tocantins.

Nesta simulação não foi possível avaliar também a perda de água, por drenança, para as unidades em contato com a porção basal do Urucuia, em razão de incertezas relacionadas às propriedades hidráulicas e espessuras das rochas subjacentes ao SAU. Todavia, as simulações empreendidas indicaram que tal fato deve ocorrer.

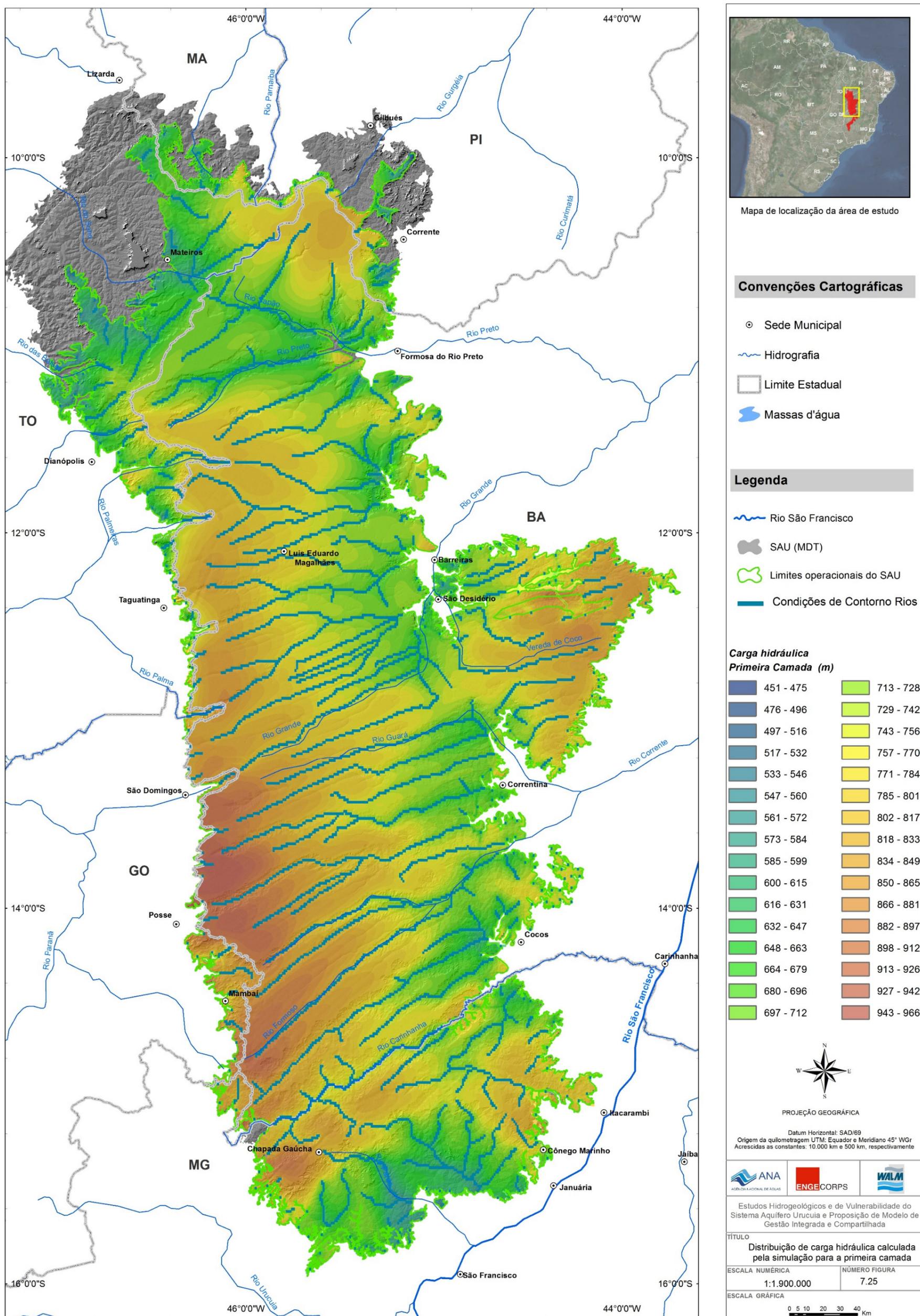


Figura 7.25 - Distribuição de carga hidráulica calculada pela simulação para a primeira camada.

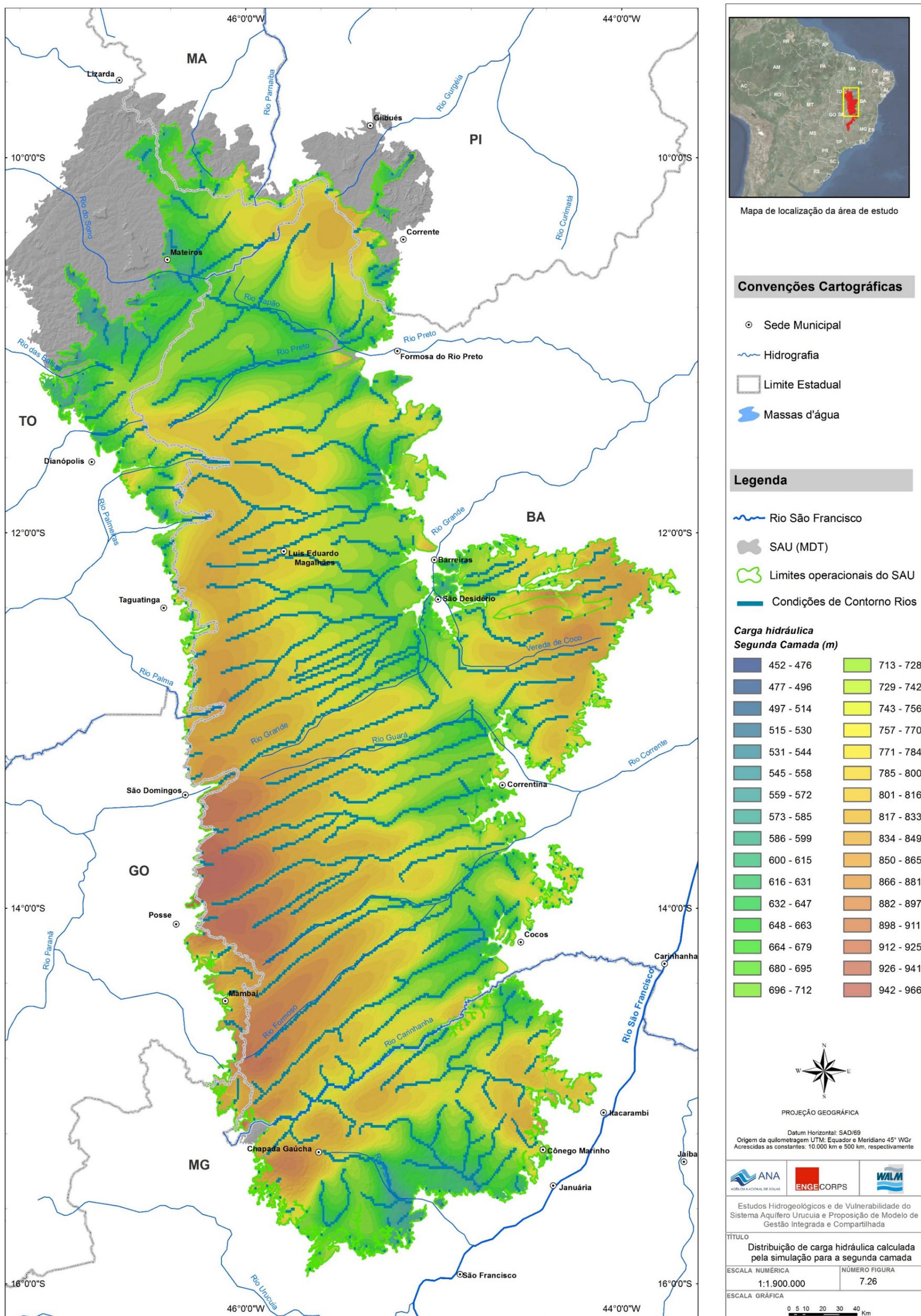


Figura 7.26 - Distribuição de carga hidráulica calculada pela simulação para a segunda camada

7.1.7 Avaliação de Cenários de Mudanças Climáticas no SAU

As alterações ambientais, sobretudo aquelas relacionadas às alterações do clima no nosso planeta, têm adquirido grande relevância nestes últimos anos, uma vez que afetam de forma significativamente negativa a vida de todos os seres vivos.

Relativamente aos recursos hídricos, as adversidades climáticas interferem, da mesma maneira, de forma dramática, pois alteram o ciclo hidrológico e, por consequência, todo o regime pluviométrico de determinada região. Essas alterações terminam por interferir em todo o processo de recarga dos mananciais, sejam eles superficiais ou subterrâneos.

Portanto, o aumento de temperatura devido às mudanças climáticas tem efeitos diretos sobre o ciclo hidrológico, alterando os montantes pluviométricos, sua distribuição temporal e espacial (frequência de secas e enchentes), afetando, dessa forma, os processos hidrológicos tais como o escoamento e a infiltração. Essas mudanças irão afetar o armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, a recarga dos aquíferos.

Nesse contexto, as mudanças climáticas podem afetar espacial e temporalmente os níveis dos aquíferos, o que tem conseqüências não apenas para o abastecimento humano, mas também para a capacidade de regularização dos grandes rios (com efeitos sobre todos os usos da água, consuntivos ou não).

O *Relatório de Avaliação Nacional*, do “Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas” (PBMC, 2012), apresentou os principais resultados científicos consensuais, baseados nos resultados de modelagem climática global e regional, das projeções regionalizadas de clima, envolvendo os diferentes biomas do Brasil, considerando os períodos de início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071-2100) do século XXI.

Com base nos resultados dos estudos citados e, em virtude do alto grau de vulnerabilidade das regiões Norte e Nordeste do Brasil, as projeções mais preocupantes para o final do século, no Brasil, são:

- (i) Para a região nordeste: *tendências de aquecimento na temperatura do ar e de diminuição nos padrões regionais de chuva; e*
- (ii) Para os biomas Amazonia e Caatinga: *as tendências de aquecimento na temperatura do ar e de diminuição nos padrões regionais de chuva seriam maiores do que a variação média global.*

Os estudos realizados concluíram que o impacto esperado das alterações climáticas de longo prazo sobre os aquíferos brasileiros para 2050 irá levar a uma severa redução em 70% da recarga nos aquíferos da região Nordeste (comparando aos valores de 2010), variando de 30% a 70% na região Norte. Outro impacto esperado é o aumento da demanda e a diminuição da disponibilidade de água de superfície que vai fazer a população voltar-se para os aquíferos como sua principal fonte de água para uso público ou privado em muitas regiões do país.

Com o intuito de auxiliar futuras avaliações de risco e desenvolvimento de estratégias de adaptação, o presente trabalho apresentou uma síntese das saídas dos modelos de circulação global (GCMs) para a região do SAU.

Esses modelos agrupam simulações de temperatura média do ar na superfície e precipitação de 22 GCMs, bem como três cenários, publicados pelo AR4 do IPCC, em 2007. Para tal, utilizou-se o método de Clima Futuro Representativo, similar ao apresentado por Whetton et al. (2012), o qual descreve os climas futuros mais prováveis e mais impactantes dentro das inúmeras simulações.

Uma característica desse método é a capacidade de avaliar a probabilidade de mudanças de acordo com o número de simulações concordantes. Essa avaliação é considerada importante, uma vez que risco é definido como a combinação de impacto e de probabilidade. Dessa maneira torna-se simples a identificação de uma gama de possibilidades, incluindo a “mais provável”, “menor mudança” e “maior mudança” (ou seja, “mais úmido” e “mais seco” para precipitação). Os principais resultados aqui identificados foram os seguintes climas futuros:

a) Temperatura média na superfície

✧ 2021-2050

- “menor mudança”: aumento de 0,6 a 1°C (10% de probabilidade);
- “mais provável”: aumento de 1,1 a 1,5°C (44% de probabilidade);
- “maior mudança”: aumento de 2,6 a 3,0°C (4% de probabilidade);
- Alcance: aumento de pelo menos 0,6 até 2,0°C (100% e 90% de probabilidade, respectivamente).

✧ 2051-2080

- “menor mudança”: aumento de 1,1 a 1,5°C (6% de probabilidade);
- “mais provável”: aumento de 2,1 a 2,5°C (28% de probabilidade);
- “maior mudança”: aumento de 3,6 a 4,0°C (6% de probabilidade);
- Alcance: aumento de pelo menos 1,1 até 3,5°C (100% e 94% de probabilidade, respectivamente).

b) Precipitação

✧ 2021-2050

- “mais úmido”: aumento de mais de +15% (2,1% de probabilidade);
- “mais provável”: decréscimo de -0.1 a -5% (29,2% de probabilidade);
- “mais seco”: diminuição de -15.1 a -30% (8,3% de probabilidade);
- Sinal de mudança: 62,5% concordam com decréscimo.

✧ 2051-2080

- “mais úmido”: aumento de mais de +15% (10,4% de probabilidade);
- “mais provável”: decréscimo de -5.1 a -15% (29,2% de probabilidade);
- “mais seco”: diminuição de -15.1 a -30% (12,5% de probabilidade);
- Sinal de mudança: 54,2% concordam com decréscimo.

Na escala mensal, os meses de outubro a dezembro estão mais sujeitos ao aumento da temperatura. Quanto à precipitação, embora não haja um consenso entre as simulações, os resultados levam à possibilidade de uma diminuição da precipitação de maio a setembro, tornando-se esse período a época de seca mais severa.

Ainda, o estudo verificou a representatividade das simulações quanto aos climas futuros estabelecidos. Quanto à distribuição espacial de temperatura, o clima de “maior mudança” aponta para divergências quanto à localização, sendo a região sul da bacia do Urucuia a mais afetada. Ambos os períodos climatológicos aqui estudados mostram que a região nordeste da área de estudo está mais propícia às mudanças de precipitação, tanto no aumento quanto na diminuição.

Esse pequeno conjunto de climas futuros representativos e distribuição espacial pode ser utilizado em estudos de impacto. Também é possível aplicar as simulações representativas como condições de contorno para possíveis técnicas de regionalização, tais como *downscaling* estatístico e dinâmico, ou até mesmo como entrada para os modelos hidrológicos e hidrogeológicos. No entanto, é importante ressaltar que as projeções dos GCMs são, por natureza, propícias a uma gama de incertezas, que devem sempre ser levadas em consideração.

Dessa forma, com base nos resultados das simulações climatológicas para os períodos correspondentes aos anos de 2021 a 2050, e os anos de 2051 e 2080 (Borges & Bernhofer, 2013), foram realizadas simulações numéricas de fluxo com vistas a avaliar impactos na potenciometria e escoamento de base do SAU, em face às mudanças climáticas estatisticamente mais prováveis.

7.1.7.1 Simulação de Fluxo do SAU para os Cenários de Mudanças Climáticas

Como uma primeira abordagem para as simulações de fluxo do SAU em períodos de redução de precipitação, foi empregada a relação recarga/precipitação em razão da inexistência de dados suficientes para operacionalização dos modelos numéricos hidrológicos e, conseqüentemente, obtenção das variações das taxas de recarga. Nesta simulação, a redução na taxa de recarga em razão da diminuição de precipitação foi estimada com base nas razões apresentadas no Quadro 7.10, considerando o divisor de fluxo subterrâneo na delimitação das áreas das bacias simuladas. Os valores de recarga apresentados no Quadro 7.10 foram originados de simulações numéricas a partir de dados médios de escoamento de base das bacias. A calibração do modelo numérico envolve a variação dos parâmetros hidráulicos do aquífero e do escoamento de base (recarga), de modo a reproduzir as condições da superfície potenciométrica, razão pela qual os valores de recarga utilizados na calibração do modelo diferem dos valores obtidos nos estudos hidrológicos.

QUADRO 7.10 - VALORES DE RECARGA E RELAÇÃO RECARGA/PRECIPITAÇÃO UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO.

<i>Zona de Balanço</i>	<i>Recarga (mm/ano)</i>	<i>Recarga/Precipitação</i>
Rio Pandeiros	160,00	0,15
Rio Carinhanha	200,00	0,19
Rio Coxá	130,00	0,12
Rio Corrente	230,00	0,21
Rio Grande	190,00	0,15
Rio Preto	220,00	0,18

Como os cenários oferecem intervalos de variações no volume total de precipitação, adotou-se o valor mais adverso, com vistas à avaliação do pior cenário esperado. Diante desse contexto, empregou-se como referência uma redução de 5% nos valores de precipitação entre os anos de 2021 e 2050 e uma redução de 15% entre os anos de 2051 e 2080. Mantendo-se fixada a relação Recarga/Precipitação antes apresentada, uma redução de 5% na precipitação resultou em uma redução de 5% nos valores iniciais de recarga no período compreendido entre os anos de 2021 e 2050. De maneira similar, uma redução de 15% na precipitação entre os anos de 2051 e 2080 resultou em uma redução de 15% nos valores de recarga no período considerado.

Sob a premissa de que o SAU é essencialmente do tipo livre, alterações na taxa de recarga se refletem proporcionalmente nos valores de escoamento de base, com um reequilíbrio imediato no balanço hídrico. Nesse caso, foram realizadas simulações em regime permanente com diferentes valores de recarga, de modo a representar diferentes cenários futuros.

Com base nesses novos valores de recarga, foram estimadas alterações nos valores de carga hidráulica e de escoamento de base. Deste modo, foi possível estimar a sensibilidade do SAU frente às mudanças climáticas esperadas.

✓ **Resultado das Simulações 2021-2050**

A Figura 7.27 ilustra a variação de carga hidráulica simulada ao longo do SAU no período compreendido entre os anos de 2021 e 2050, em função das mudanças climáticas adversas mais prováveis. Como pode ser observado na figura, as alterações mais significativas são registradas nas regiões que compreendem a bacia do rio Corrente e bacia do rio Preto, e menos significativas nas regiões compreendidas pelas bacias do rio Coxá (Carinhanha) e bacia do rio Grande.

A Figuras 7.28 ilustra os gráficos as respectivas variações temporais de carga hidráulica na porção central das 6 bacias avaliadas neste trabalho no período compreendido entre os anos de 2021 e 2050.

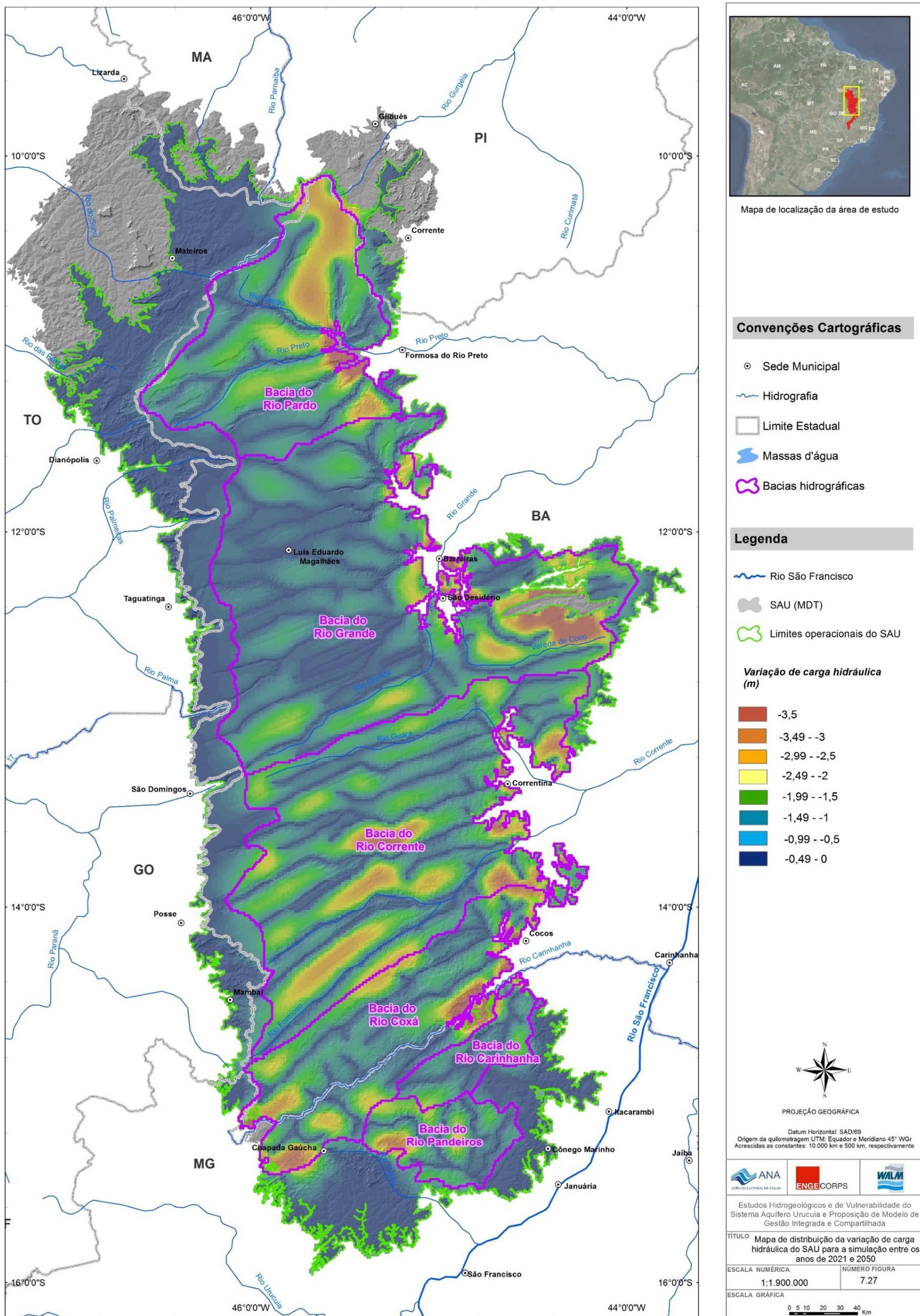


Figura 7.27 - Mapa de distribuição da variação de carga hidráulica do SAU para a simulação entre os anos de 2021 e 2050.

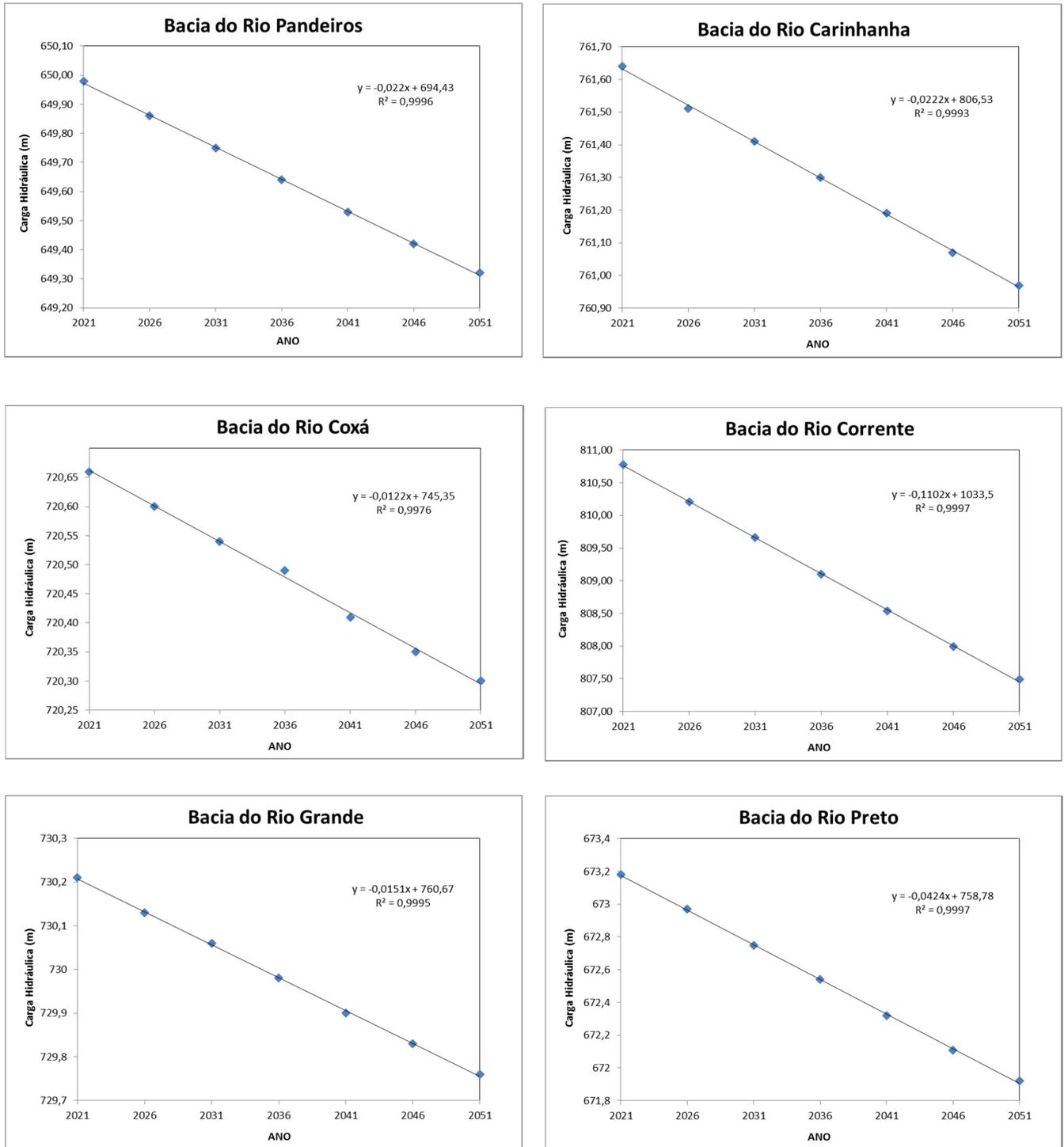


Figura 7.28 - Variação de carga hidráulica para a simulação entre 2021 e 2050 nas bacias drenadas pelo SAU.

Como pode ser observado na figura anterior, a redução nos valores de carga hidráulica possui uma relação linear com a queda na taxa de recarga. Adicionalmente, é possível avaliar que as maiores alterações nos valores de carga hidráulica estão situadas na bacia do rio Corrente, onde o rebaixamento da potencimetry é superior a 3 metros. Por outro lado, o rebaixamento de níveis nas bacias dos rios Coxá e Grande é bastante discreto, inferior a 0,5 m. Este fato está relacionado à densidade de drenagens (zonas de descarga) e à geometria (dimensões e espessura) de cada uma das sub-bacias.

Considerando que o volume de água que sai em forma de escoamento de base equivale ao volume de água que entra no aquífero por recarga. Deste modo, uma redução de 5% no volume de recarga induz a uma redução equivalente no escoamento de base, conforme mostrado na figura 7.29. Em razão das simplificações e condições de contorno impostas pelo modelo numérico de fluxo, a redução no escoamento de base resulta em valor médio de 4,6%.

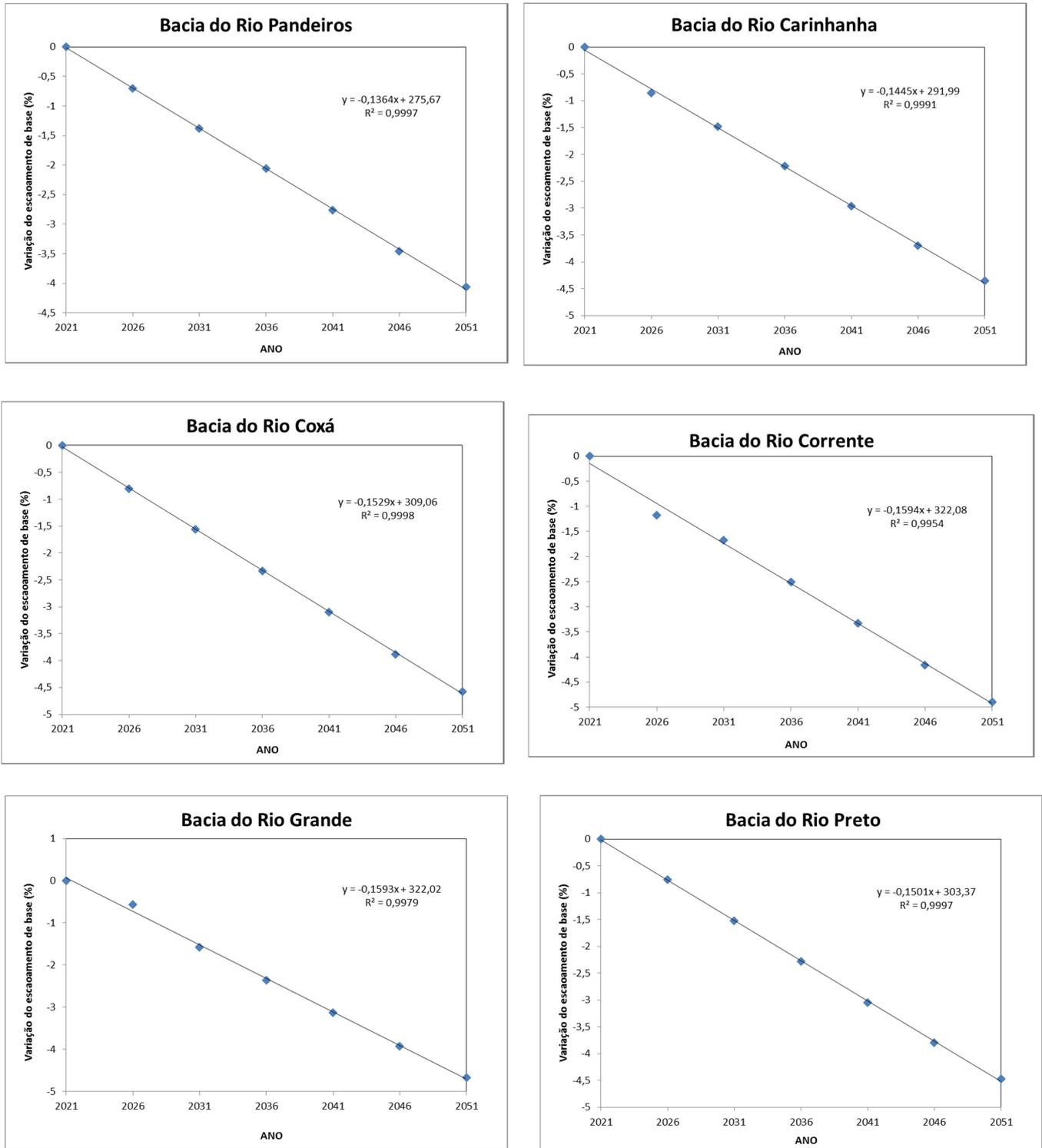


Figura 7.29 - Porcentagem de variação no escoamento de base para a simulação entre 2021 e 2050 nas bacias drenadas pelo SAU.

✓ **Resultado das Simulações 2051-2080**

A figura 7.30 ilustra a variação de carga hidráulica simulada ao longo do SAU no período compreendido entre os anos de 2051 e 2080, em função das mudanças climáticas adversas mais prováveis. De maneira similar aos resultados das simulações do período anterior, é possível observar que as alterações mais significativas são registradas nas regiões que compreendem a bacia do rio Corrente e bacia do rio Preto e menos efetivas nas regiões compreendidas pelas bacias do rio Coxá (Carinhanha) e bacia do rio Grande.

A figuras 7.31 ilustra os gráficos das variações temporais de carga hidráulica na porção central das 6 bacias avaliadas neste trabalho, durante os anos de 2051 e 2080.

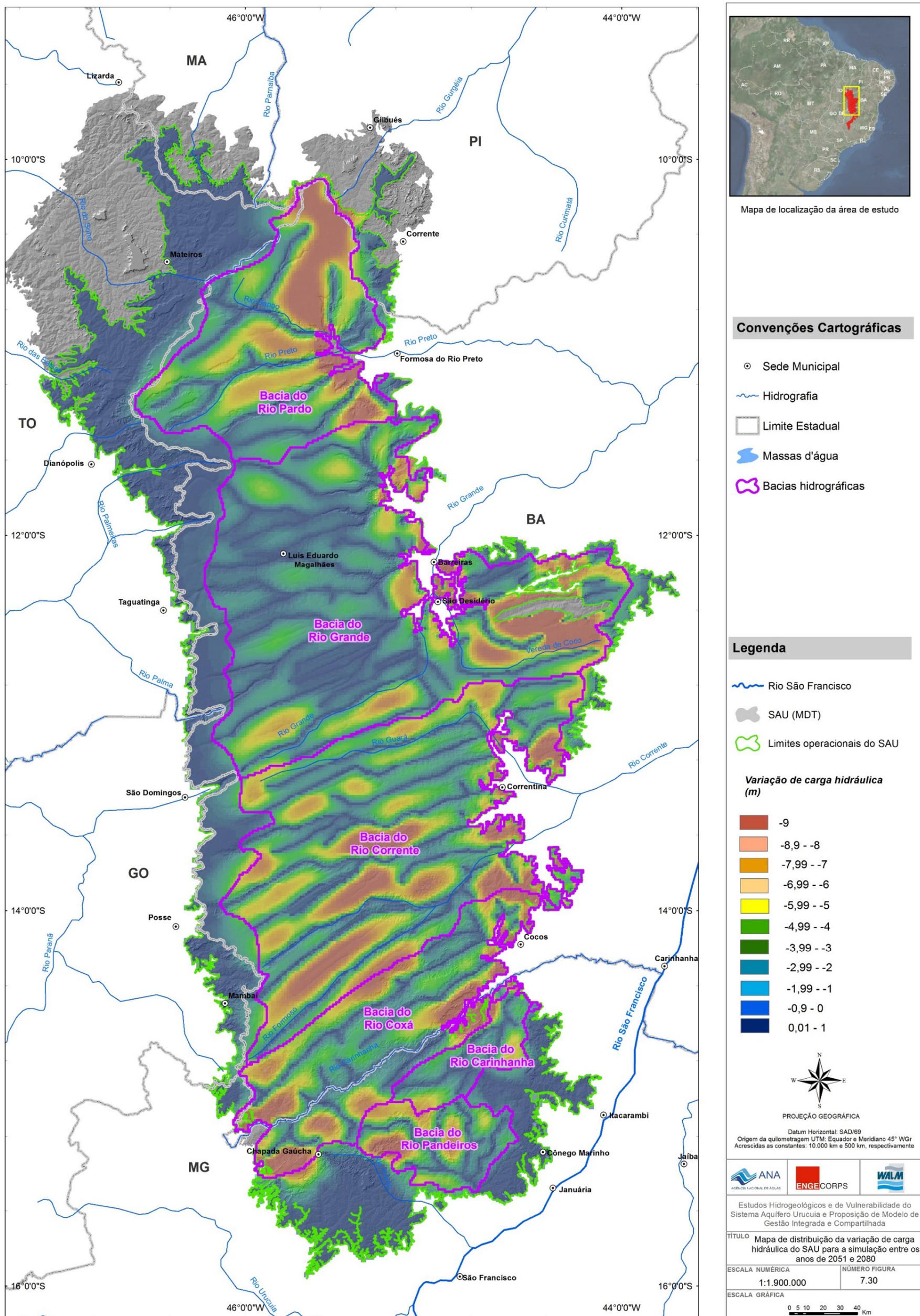


Figura 7.30 - Mapa de distribuição da variação de carga hidráulica do SAU para a simulação entre os anos de 2051 e 2080.

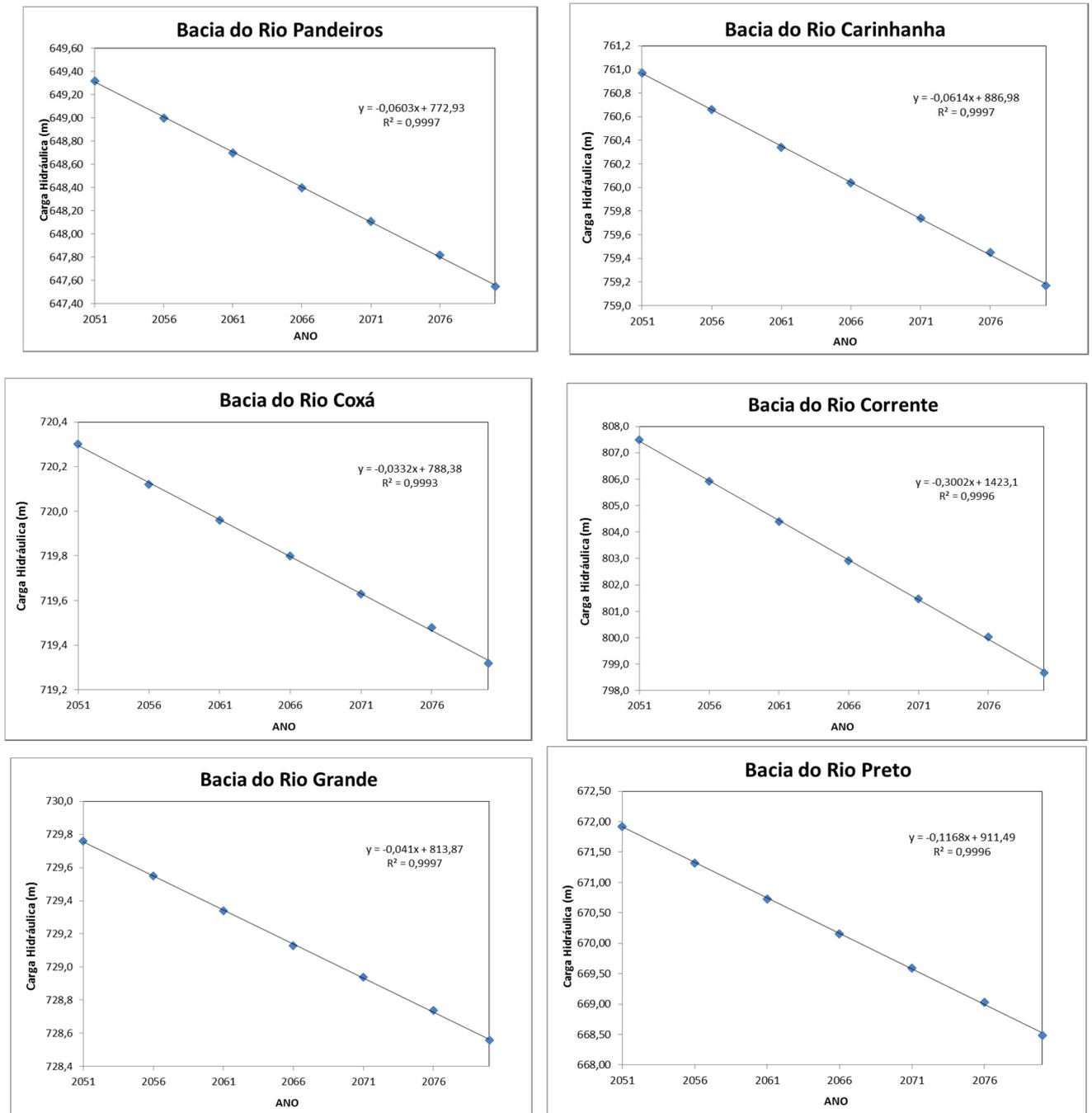


Figura 7.31 - Variação de carga hidráulica para a simulação entre 2051 e 2080 na porção central das bacias drenadas pelo SAU.

Como pode ser observado nos gráficos antes expostos, a redução nos valores de carga hidráulica possui uma relação linear com a queda na taxa de recarga, similarmente ao comportamento observado no conjunto de simulações referentes ao intervalo dos anos de 2021 e 2050. Similarmente, é possível avaliar que as maiores alterações nos valores de carga hidráulica estão situadas na bacia do rio Corrente, onde o rebaixamento da potenciométrica é aproximadamente igual a 9,0 metros. Por outro lado, o rebaixamento da potenciométrica nas bacias dos rios Coxá e Grande é menos efetivo, em torno de 1,0 m. Esse fato está relacionado à densidade de drenagens (zonas de descarga) e à geometria (dimensões e espessura) de cada uma das sub-bacias.

Similarmente aos resultados observados nas simulações referentes ao período de 2021 a 2050, existe uma correspondência direta entre o volume de água que sai por escoamento de base e o volume de água que entra no aquífero por recarga. Neste caso, uma redução de 15% da recarga no modelo induz a uma redução proporcional do escoamento de base. Em razão das simplificações e condições de contorno impostas pelo modelo numérico de fluxo, a redução no escoamento de base resulta em valor médio de 12,5%, como observado na figura 7.32.

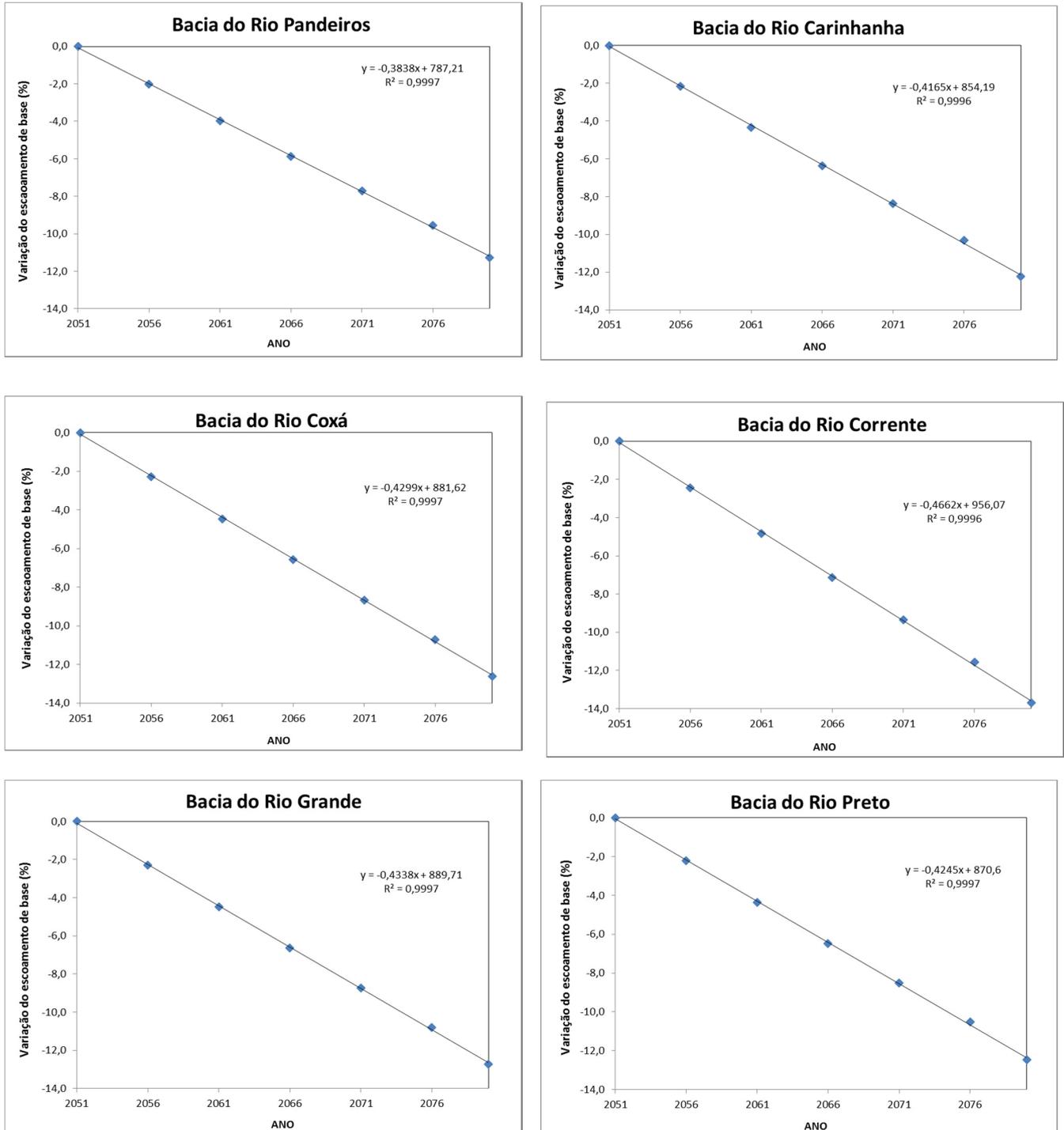


Figura 7.32 - Porcentagem de variação no escoamento de base para a simulação entre 2051 e 2080 nas bacias drenadas pelo SAU.

O Quadro 7.11 mostra os valores de escoamento de base simulados em quinquênios para as bacias estudadas, no intervalo de tempo de 2021 a 2080, tendo como cenário as variações pluviométricas mais prováveis apontadas na simulação climática.

QUADRO 7.11 - VALORES DE RECARGA SIMULADOS PARA O PERÍODO DE 2021 A 2080

Ano	Escoamento de base (m ³ /dia)					
	Rio Pandeiros	Rio Carinhanha	Rio Coxá	Rio Corrente	Rio Grande	Rio Preto
2021	1584500	6272100	903740	14672000	14985000	7537500
2026	1573400	6218300	896470	14500000	14900000	7480100
2031	1562700	6179100	889650	14427000	14749000	7422600
2036	1551900	6133000	882600	14305000	14631000	7365200
2041	1540700	6086100	875720	14184000	14515000	7307900
2046	1529700	6040000	868680	14061000	14396000	7251200
2051	1520100	5999000	862410	13954007	14285000	7200300
2056	1489600	5870000	842720	13613007	13959007	7041900
2061	1459600	5739400	823960	13281007	13644007	6885500
2066	1430900	5616600	805710	12960007	13337007	6734000
2071	1402900	5496400	787740	12648000	13037000	6587900
2076	1375100	5379700	770100	12340000	12742000	6442100
2080	1348800	5265500	753550	12042000	12468000	6303100

7.1.7.2 Considerações Finais

Pelos estudos realizados, observa-se uma relação linearmente dependente entre os valores de recarga e as consequentes variações entre carga hidráulica e escoamento de base.

Durante o período de 2021 a 2050, observa-se que a redução de 5% nos valores de precipitação induz a uma redução média de 4,6% nos valores de escoamento de base. Adicionalmente, uma redução de 15% nos valores de recarga, esperado para os anos de 2051 a 2080, induz uma redução média de 12,5% nos valores de escoamento de base. Este fato está relacionado à densidade de drenagens (zonas de descarga) e à geometria (dimensões e espessura) de cada uma das sub-bacias.

Os resultados indicam que a bacia do rio Corrente representa a região mais sensível às alterações climáticas com a consequente redução na recarga, enquanto as alterações nas bacias dos rios Coxá e Grande são mais discretas.

Deve-se ressaltar que os cenários aqui simulados não contemplam as variações em virtude dos eventuais impactos gerados pelo bombeamento excessivo do SAU, nem sobre mudanças ocasionadas pelo manejo do solo. É esperado que as variações de carga hidráulica e escoamento de base sejam mais elevados do que os resultados aqui apresentados.

A influência das mudanças climáticas no SAU torna-se evidente ao ser registrado o decréscimo nos valores de precipitação a partir da década de 80 com a consequente redução nos valores de escoamento de base. Em termos de gestão de recursos hídricos, tal fato não pode ser

negligenciado, devendo-se considerar a perda de água superficial e subterrânea disponível em resposta às alterações no ciclo hidrológico. Entretanto, a ausência de informações consistentes e em quantidade satisfatória não permite atualmente, uma avaliação menos incerta. Sugere-se, a aquisição progressiva de informações para o aprimoramento dos modelos matemáticos e simulação de cenários mais realistas.

7.2 SISTEMA AQUÍFERO AREADO – SAA

7.2.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual do SAA

O Sistema Aquífero Areado (SAA) estende-se por cerca de 22 mil Km² pela região sul da área de estudo, com uma área operacional de 15.485 Km², estabelecido pela consultoria executora dos estudos com base em critérios geológicos e geomorfológicos, conforme detalhado no Volume 1 Tomo I do Relatório Final. Destaca-se, contudo, que assim como na região de ocorrência do SAU, também na área do SAA, embora tenha sido definida uma “área operacional” para fins de cálculos gerais desse manancial, o levantamento de dados dos estudos abrangeu toda área de afloramento dos grupos Areado e Mata da Corda e litologias do embasamento, conforme definida nos termos de referência dos estudos.

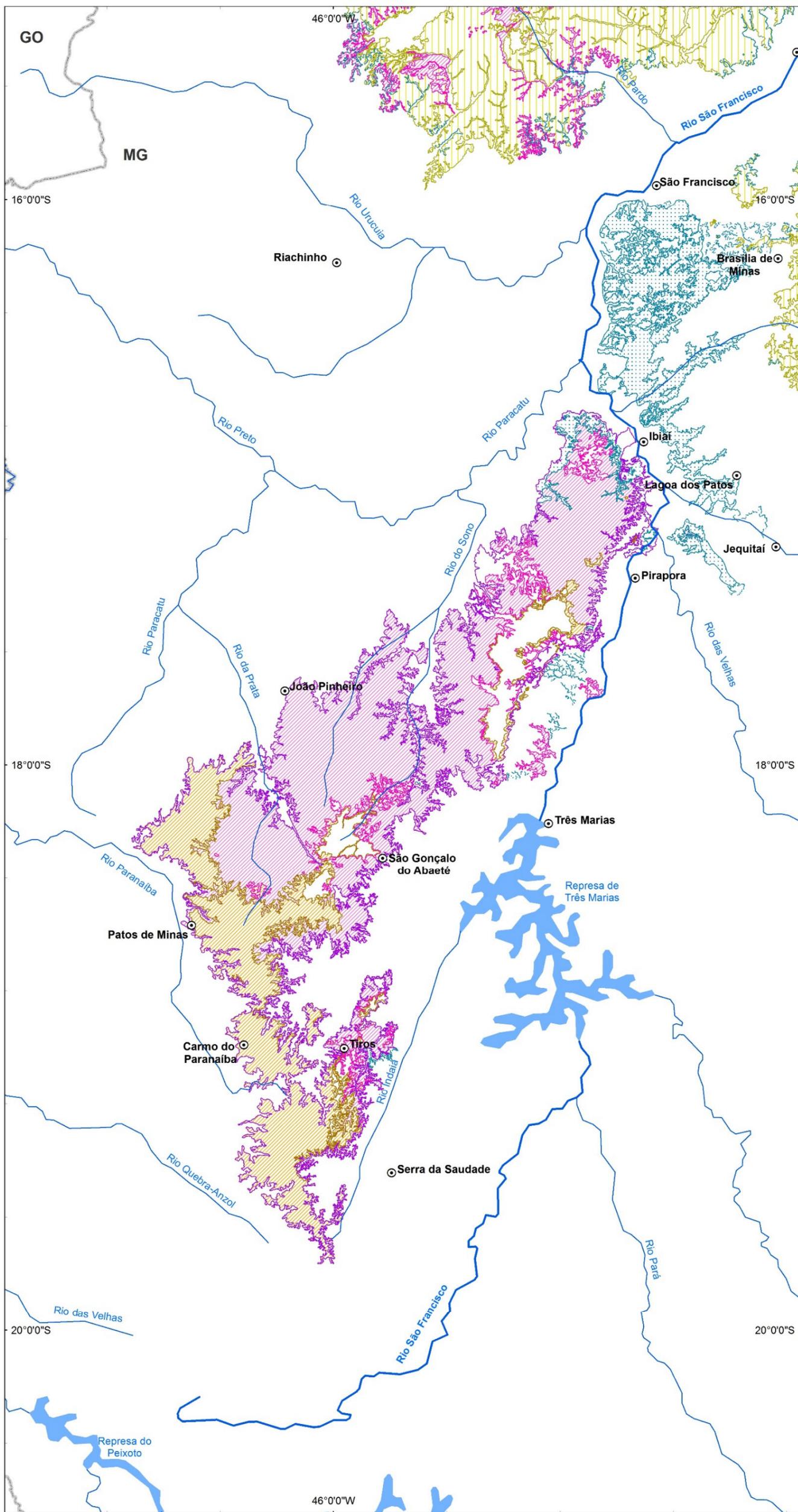
O Sistema Aquífero Areado é definido pelo conjunto de unidades hidroestratigráficas que compõem este sistema, conforme aqui definido, estende-se por faixa orientada na direção nordeste com cerca de 250 km de comprimento e largura variável da ordem de 40 km a 60 km. Na porção terminal sul da faixa ocorre apêndice orientado na direção noroeste, com dimensões médias de 90 km de comprimento por 45 km de largura (Figura 7.33), no qual afloram predominantemente rochas do Grupo Mata da Corda.

Constituído por rochas sedimentares e vulcanoclásticas, com idades atribuídas entre o Neocomiano e o Senoniano, distribuídas respectivamente nos grupos Areado e Mata da Corda, situadas no compartimento tectônico definido como sub-bacia Abaeté (Campos & Dardene 1997b), porção sul da Bacia Sanfranciscana. Esse pacote rochoso encontra-se parcialmente sobreposto por coberturas cenozoicas e assenta-se diretamente sobre o embasamento proterozoico, representado por metassedimentos do Grupo Bambuí.

Na parte sul da área de estudo, as rochas do Grupo Areado e Mata da Corda distribuem-se num corpo alongado principal e em vários núcleos bastante fragmentados e dispersos no entorno, segundo base geológica da CPRM (2004). Esses núcleos fragmentados não apresentam conectividade hidráulica com o corpo principal.

A despeito da importância destas porções dispersas no que tange ao recebimento da recarga direta propiciada pelas precipitações atmosféricas e à contribuição no escoamento de base dos cursos de água superficiais e para a recarga de aquíferos subjacentes como o aquífero cárstico formado pelas rochas do Grupo Bambuí; a espessura reduzida e a quantidade insuficiente de dados hidrodinâmicos disponíveis foram fatores preponderantes para a não inclusão dessas porções dentro da área operacional do SAA.

O registro sedimentar do SAA é mais diversificado e suas relações estratigráficas são mais complexas do que as encontradas no SAU. Para identificação e caracterização dos aspectos litoestratigráficos e estruturais das rochas componentes do SAA, foram realizados levantamentos de campo, análise de modelos digitais de terreno (MDT), análise estrutural de lineamentos sobre imagens SRTM, levantamentos geofísicos, além de cadastramento de poços tubulares. Também se efetuou avaliação climatológica e hidrológica nas estações daquela região.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Massas d'água
- Limite Estadual

Legenda

- Rio São Francisco
- Limite operacional do SAA

Unidade Geológica

- Grupo Areado
- Grupo Bambuí
- Grupo Urucuia
- Grupo Mata da Corda



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Unidades geológicas e área operacional do Sistema Aquífero Areado

ESCALA NUMÉRICA 1:1.450.000 NÚMERO FIGURA 7.33

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 Km

Figura 7.33 – Unidades geológicas e área operacional do Sistema Aquífero Areado.

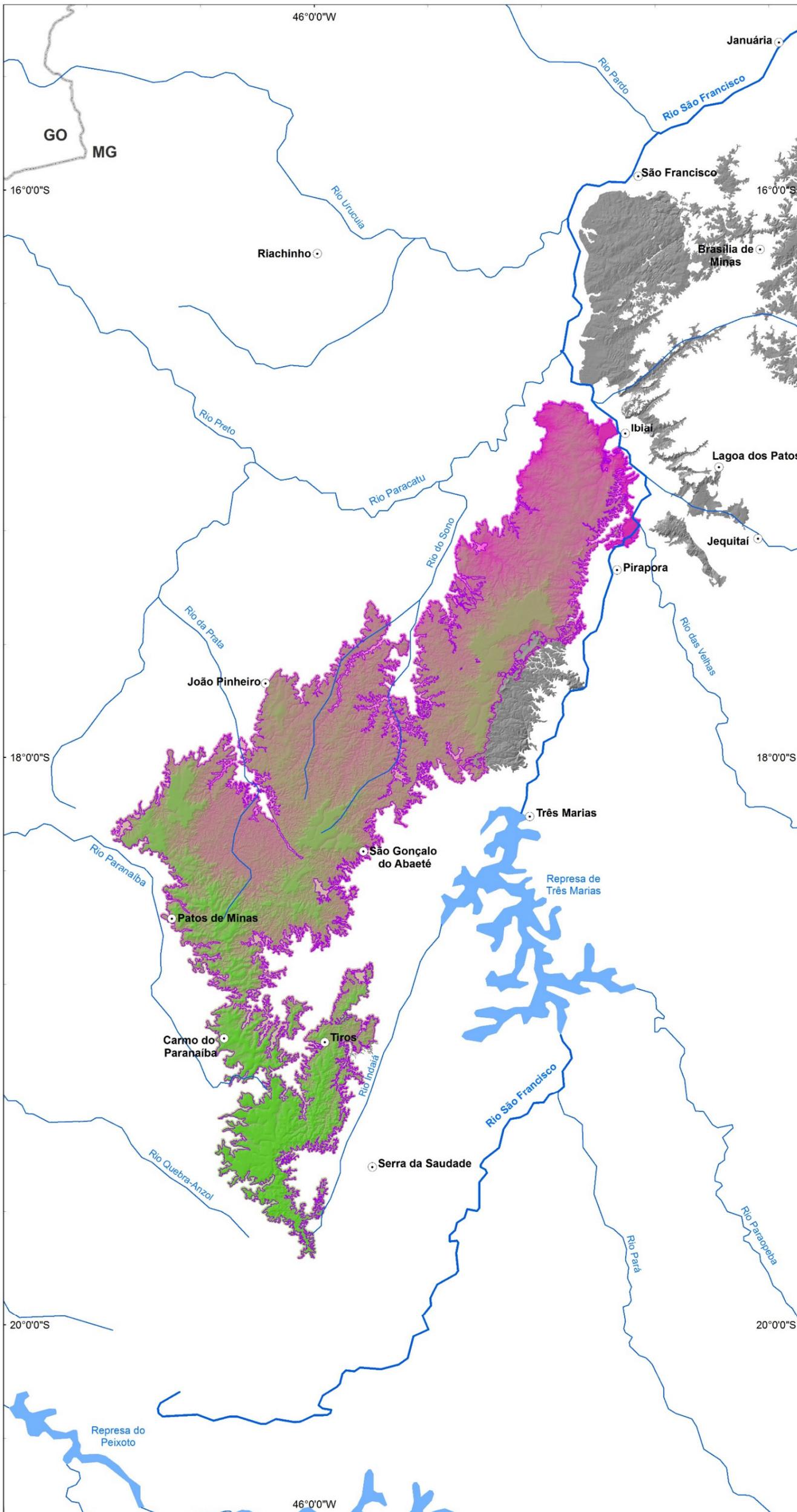
O relevo na área de ocorrência do SAA encontra-se bastante dissecado e grande parte da cobertura mesocenozoica original já foi arrasada (Figura 7.34). Na porção sul/sudeste, o SAA apresenta altitudes que podem alcançar mais de 1.200 metros e que caem suavemente (1,2 m/km) para nordeste, onde chegam a atingir valores inferiores a 500 metros de altitude nas porções limítrofes do aquífero (Figura 7.35).

A base do sistema aquífero, representada pelo mapa de contorno estrutural da base do Grupo Areado e Mata da Corda foi elaborado com 338 dados altimétricos do topo do embasamento extraídos de modelo digital de terreno e 10 dados interpretados de sondagens elétricas verticais (SEVs), interpolados e filtrados para eliminação de ruídos com emprego de técnicas computacionais. Esse mapa mostra que o substrato proterozoico mergulha de sudeste para nordeste, acompanhando aproximadamente a superfície topográfica do terreno (Figura 7.36).

A espessura total do SAA constituído pelas rochas dos grupos Areado e Mata da Corda foi obtida com base no método de subtração de grids entre modelo digital de terreno (Figura 7.35) e o mapa de contorno estrutural do substrato do aquífero (Figura 7.36), resultando no mapa apresentado na Figura 7.37. O resultado mostra que as maiores espessuras podem alcançar entre 200 metros e 250 metros em porções restritas associadas ao relevo de chapadas, e as menores do que 100 metros predominam em 65% da área de ocorrência do aquífero. Áreas com espessuras menores do que 50 metros também são frequentes.



Figura 7.34 – Relevo dissecado com exposição de rochas do Grupo Areado (Presidente Olegário, MG).



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Limite Estadual
- Hidrografia
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAA (MDT)
- Limites operacionais do SAA

Altitude (m)

Alto: 1.229,00
Baixo: 470,00

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
Acréscidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
ENGE CORPS
WALM

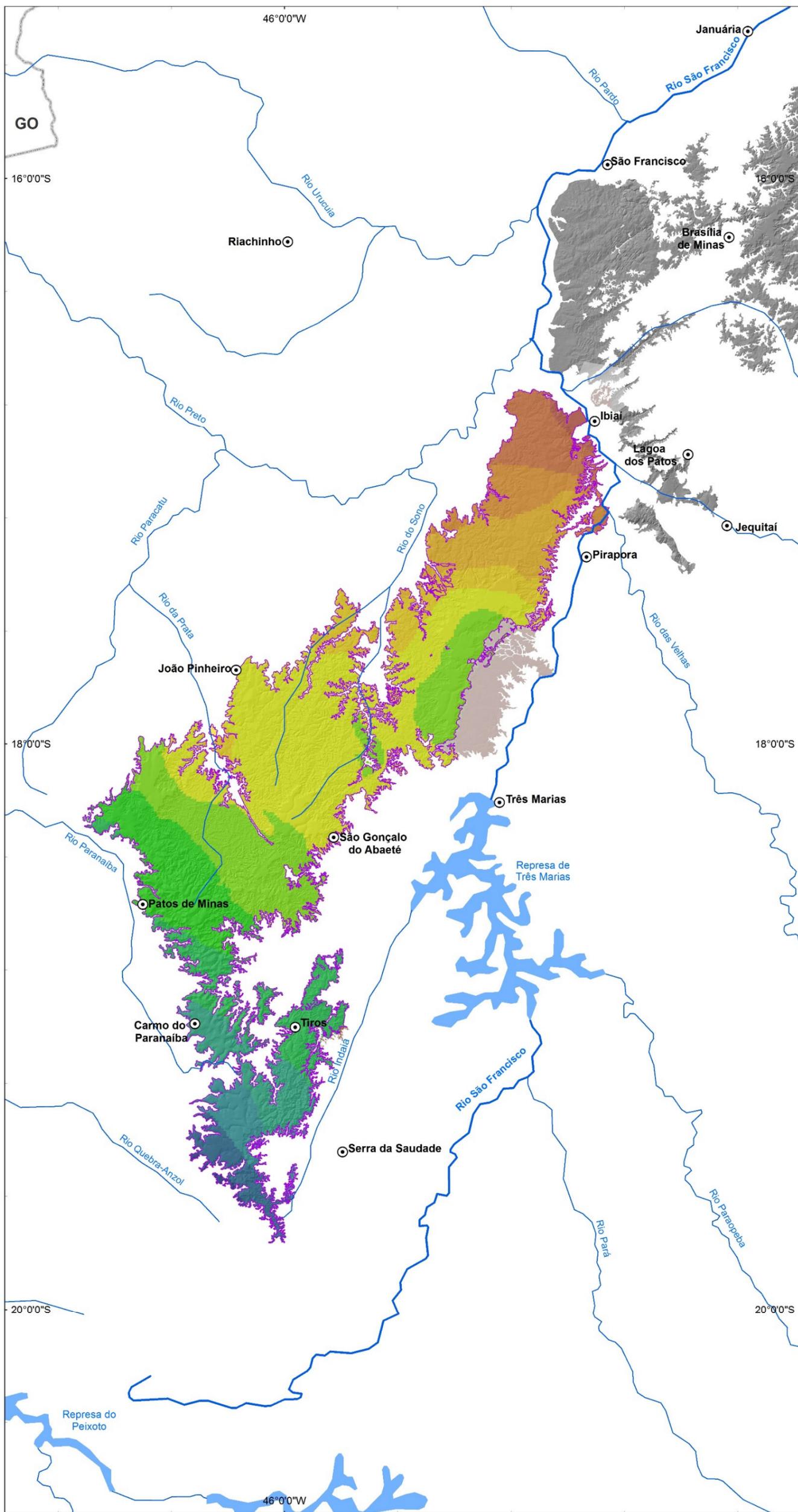
Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Modelo digital de terreno (MDT) do Sistema Aquífero Areado

ESCALA NUMÉRICA	NÚMERO FIGURA
1:1.450.000	7.35

ESCALA GRÁFICA
0 5 10 20 30 40 Km

Figura 7.35 – Modelo digital de terreno (MDT) do Sistema Aquífero Areado.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAA (MDT)
- Limites operacionais do SAA

Contorno estrutural da base dos Grupos Areado e Mata da Corda (m)

- 482-500
- 500,1 - 550
- 550,1 - 600
- 600,1 - 650
- 650,1 - 700
- 700,1 - 750
- 750,1 - 800
- 800,1 - 850
- 850,1 - 900
- 900,1 - 950
- 950,1 - 1.000
- 1.000,1 - 1.050
- 1.050,1 - 1.100



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuaia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Contorno estrutural da base dos Grupos Areado e Mata da Corda

ESCALA NUMÉRICA 1:1.450.000 NÚMERO FIGURA 7.36

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 Km

Figura 7.36 – Contorno estrutural da base do Grupo Areado.

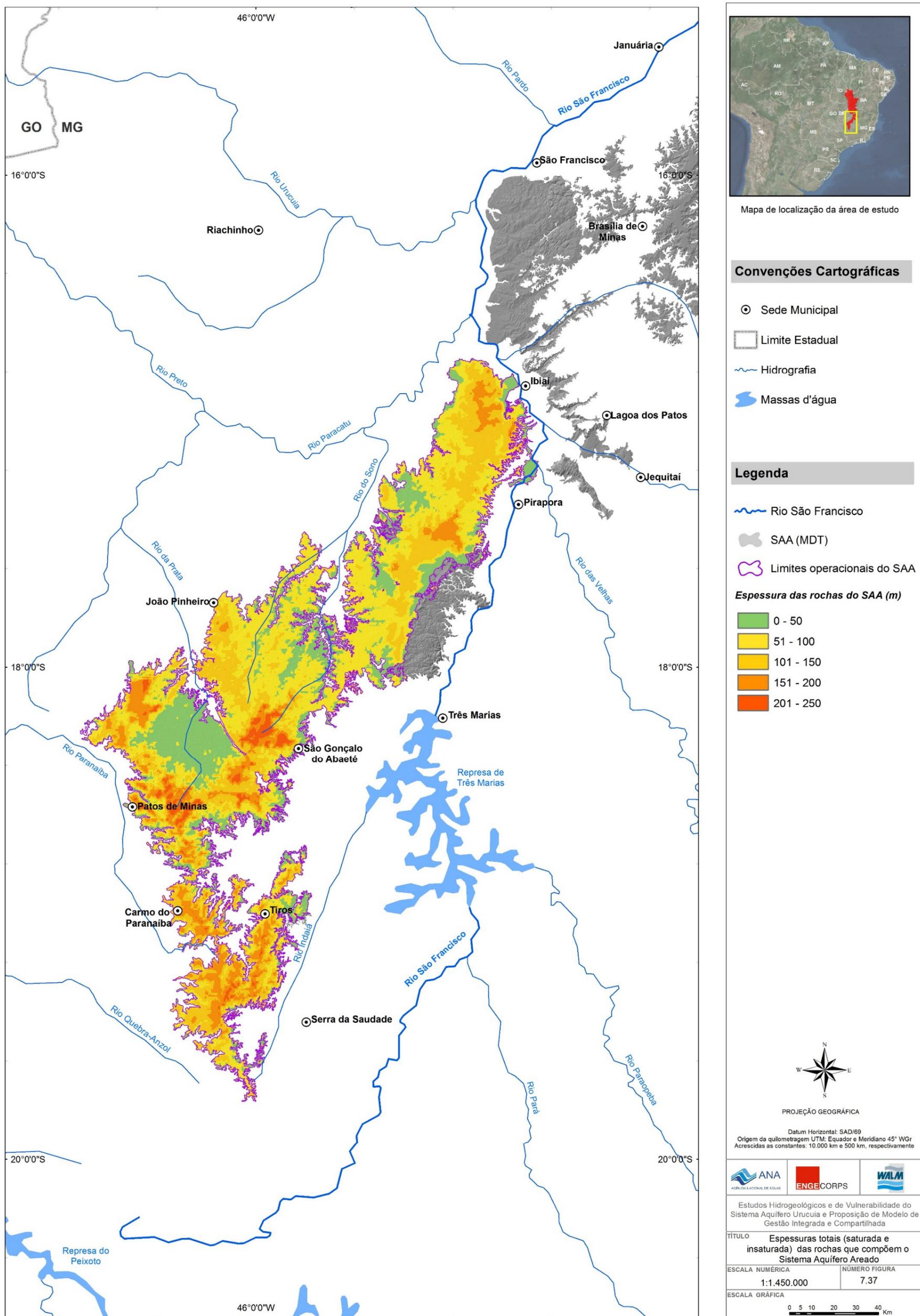


Figura 7.37 – Espessuras totais (saturada e insaturada) das rochas que compõem o Sistema Aquífero Areado.

O SAA comporta-se como um aquífero de natureza predominantemente livre, do tipo poroso, de extensão regional, contínuo e heterogêneo. Sua heterogeneidade deve-se à complexidade das relações litoestratigráficas e às variações faciológicas encontradas nas sucessões sedimentares e vulcanosedimentares, associadas respectivamente aos grupos Areado e Mata da Corda.

Com base na subdivisão litoestratigráfica do Grupo Areado, a unidade hidrogeológica definida como Sistema Aquífero Areado reúne os aquíferos Abaeté (conglomerados arenosos e arenitos conglomeráticos) e Três Barras (arenitos médios, calcíferos e conglomeráticos) e o aquífero Quiricó (siltitos e argilitos esverdeados), como mostrado no Quadro 7.12.

QUADRO 7.12 – UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS DO SAA DEFINIDAS COM BASE NAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS DO GRUPO AREADO

<i>Unidade Litoestratigráfica</i>		<i>Idade</i>	<i>Ambiente</i>	<i>Hidroestratigrafia</i>
Grupo Areado	Formação Três Barras	Cretáceo	Eólico	Aquífero Três Barras
			Flúvio-deltaico	
	Formação Quiricó		Lacustre	Aquífero Quiricó
	Formação Abaeté		Leque aluvial	Aquífero Abaeté

Do mesmo modo as rochas do Grupo Mata da Corda funcionam como aquíferos ou aquíferos haja vista sua intensa alteração, com conteúdo argiloso importante em seu arcabouço.

As relações hidroestratigráficas, ainda desconhecidas em subsuperfície, e a insuficiência de dados hidrodinâmicos e hidroquímicos não permitem, atualmente, caracterizar individualmente cada uma dessas unidades. Estudos futuros também deverão avaliar o papel das coberturas vulcânicas do Grupo Mata da Corda com relação à recarga do SAA.

O armazenamento da água no SAA ocorre nos poros dos sedimentos constituintes das rochas, as quais são predominantemente arenitos finos a médios, com intercalações de níveis de conglomerados. Os estratos representativos da Formação Quiricó, que consistem em folhelhos e siltitos, apresentam um comportamento de aquífero, onde a drenagem vertical é retardada pela baixa condutividade hidráulica desse pacote rochoso.

Onde aflorante, o SAA é reabastecido diretamente pelas águas provenientes das precipitações atmosféricas que atingem a superfície do terreno e se infiltram pelas camadas superiores, não saturadas, até alcançar a zona saturada e constituir as reservas hídricas. A partir daí, as águas subterrâneas movem-se dos pontos de carga hidráulica maior para os de carga menor, até serem descarregadas para os cursos de água superficiais formadores das bacias hidrográficas da região, destacando-se as bacias dos rios da Prata, Sono, Paracatu, Tiros e São Francisco.

A potenciometria do Sistema Aquífero Areado, que representa a distribuição de suas cargas hidráulicas, foi elaborado com dados de profundidade de nível de água de 30 poços tubulares, o resultado da interpretação de 10 sondagens elétricas verticais (SEVs) e pontos de descarga representados pelas intersecções das drenagens com a topografia. Os dados de poços e SEVs foram correlacionados com sua posição altimétrica no terreno para obtenção de equação

matemática de correlação (Figura 7.38), a qual mostrou bom ajuste regressivo não linear na função log neperiano.

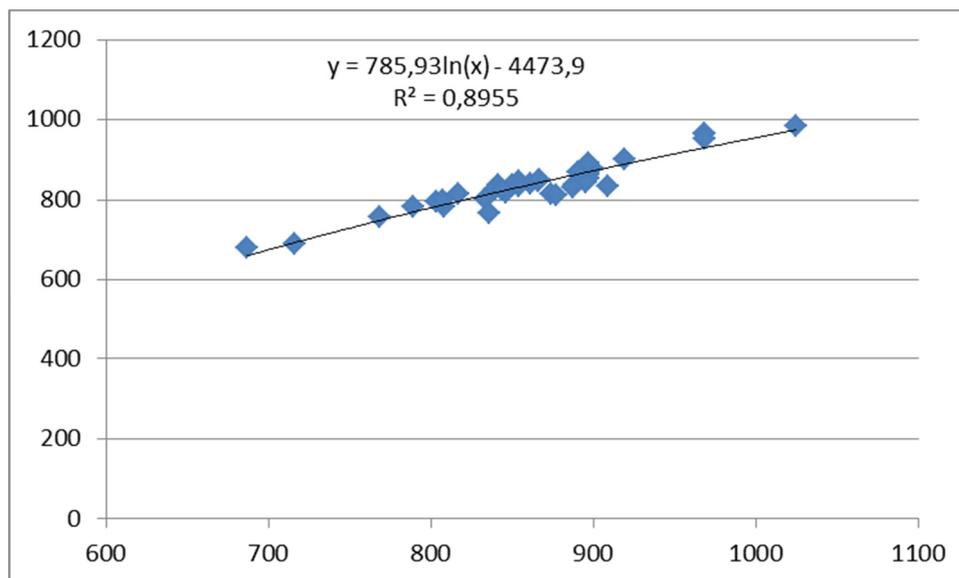


Figura 7.38 – Correlação entre altitude do terreno e cota do nível de água de poços e de sondagens elétricas verticais (SEVs) sobre o Sistema Aquífero Areado.

A equação de correlação foi aplicada aos pontos extraídos do grid do modelo digital de terreno e foi gerado novo MDT com a inclusão dos pontos de descarga superficiais. O grid resultante foi convertido em shape de isolinhas de contorno, filtrado e suavizado para eliminação de ruídos (feições pouco consistentes que não se ajustam ao modelo regional). Em seguida, utilizando-se o shape de isolinhas de contorno e o shape de drenagens, foi modelada a superfície potenciométrica hidrologicamente consistente do SAA com a ferramenta *topo to raster* (ArcGis®), que resultou num raster representativo da carga hidráulica do SAA e um shape de isolinhas de potencimetria, o mapa potenciométrico do SAA (Figura 7.39).

O mapa potenciométrico do SAA mostra que a tendência geral do fluxo subterrâneo regional é no sentido de sudoeste para nordeste da área. No terço sudoeste da área, a descarga subterrânea é direcionada principalmente pelo Rio da Prata (afluente do rio Paracatu), que drena as águas do SAA e flui no sentido noroeste. No terço médio, o fluxo subterrâneo regional mantém-se no sentido de sudoeste para nordeste, descarregando suas águas no Rio do Sono (afluente do rio Paracatu), que também flui no sentido nordeste. No terço nordeste, o fluxo subterrâneo regional é no sentido de sudeste para noroeste e contribui com a rede de drenagem da bacia do Rio Paracatu.

O comportamento hidrogeológico evidenciado pelos fluxos subterrâneos mostra importante contribuição para a bacia do rio Paracatu, afluente da margem esquerda do rio São Francisco. Essa contribuição foi apenas avaliada apenas em um dos afluentes do Rio do Sono, o rio Paracatu, por meio da avaliação da contribuição do fluxo de base na estação Cachoeira das Almas (42850000), a qual terá seus dados utilizados nos cálculos adiante.

7.2.2 Avaliação da Recarga do SAA

As áreas de recarga do SAA são consideradas aquelas que apresentam expostas as rochas do Grupo Areado, especialmente os arenitos, capazes de permitir a infiltração direta de águas pluviais na zona saturada do sistema aquífero. Nesse sentido, para fins de delimitação dessas áreas adotou-se neste trabalho o critério da declividade do terreno.

Áreas com baixa declividade topográfica admite-se que conseguem reter águas pluviais por mais tempo e facilitar a infiltração no terreno, ao passo que, áreas com declividade alta favorecem o escoamento superficial.

Assim, definiu-se como critério de definição de áreas de recarga no SAA aquelas situadas em terrenos com declividades de até 10%, enquanto que os terrenos com declividades superiores a 10%, planícies aluvionares e cursos de água superficiais foram considerados áreas de descarga. O mapa de áreas de recarga e descarga do SAA (Figura 7.40) mostra que as áreas de recarga correspondem a 60% e as áreas de descarga a 40% da área operacional do SAA. Todavia, deve-se considerar o uso e ocupação do solo empregado nessas áreas.

Segundo pode-se observar no mapa as áreas de descarga do SAA são representadas pelos cursos de água superficiais que descarregam a água subterrânea, sendo esse sistema aquífero contribuinte da vazão ou escoamento de base (Eb) de importantes afluentes do rio Paracatu (Médio São Francisco).

Segundo o método apresentado em ANA (2013), entretanto, a reserva renovável ou como denominada no Relatório de Conjuntura de Recursos Hídricos, a *Recarga Potencial Direta (RPD)* pode ser obtida por uma parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente chega aos aquíferos livres.

Assim, para efeitos de cálculos da RPD do Sistema Aquífero Areado foi considerada a área operacional do SAA (15.485 Km²) definida neste trabalho. O coeficiente de infiltração utilizou-se aquele obtido na análise hidrológica da estação fluviométrica Cachoeira das Almas (Posto 42850000), localizada na bacia hidrográfica do rio do Sono (16,7%) e a precipitação média anual utilizada foi de 1.325 mm da estação. Deste modo, o valor da RPD, conforme as equações abaixo, ficou em 109 m³/s ou 3,44 km³/ano (Quadro 7.13).

$$RPD = 15.485Km^2 \cdot 16,7\% \cdot 1325mm$$

$$RPD = 109 m^3/s \text{ ou } 3,44 Km^3/ano$$

QUADRO 7.13 – ESTIMATIVA DE RECARGA NA ÁREA OPERACIONAL DO SAA

Área operacional (Km ²)	Coefficiente de infiltração (%)	Precipitação média anual (mm)	RPD (m ³ /ano)	RPD (km ³ /ano)
15.485	16,7	1.325	109	3,44

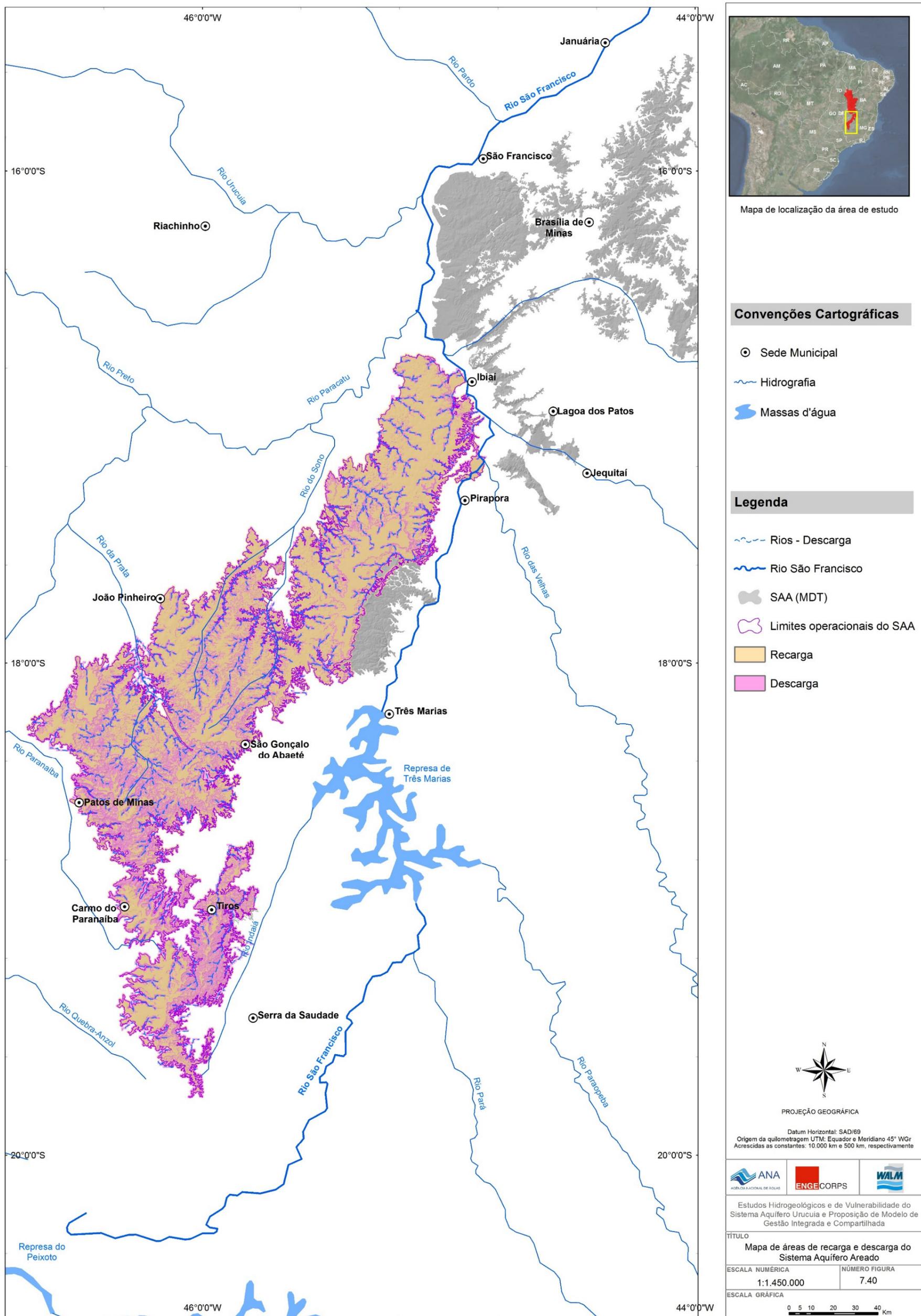


Figura 7.40 – Mapa de áreas de recarga e de descarga do Sistema Aquífero Areado.

7.2.3 Reservas e Disponibilidades Hídricas do Sistema Aquífero Areado

7.2.3.1 Reservas

Para os cálculos das reservas e disponibilidade hídrica do SAA levou-se em consideração as mesmas premissas utilizadas para o SAU. Deste modo, apresentar-se-à os cálculos de reservas reguladoras com base em dados de entrada (coeficiente de infiltração e precipitação), ou seja, conforme item anterior, equivalente à Recarga Potencial Direta (RPD).

Para o cálculo das reservas permanentes (R_p) correspondentes ao volume de água acumulado no aquífero não variável em decorrência de flutuações sazonais da superfície potenciométrica, utilizou-se o conhecimento das dimensões e espessura saturada do aquífero, com base a seguir:

$$R_p = A.E.\phi_e = V.\phi_e$$

Onde: A é a área do aquífero; E, representa a espessura saturada do aquífero; ϕ_e , a porosidade eficaz do material constituinte do aquífero; e, V é o volume rochoso saturado.

Para o cálculo do volume rochoso saturado do SAA foram utilizados os mapas potenciométrico e de contorno estrutural do embasamento. Pelo método de subtração de grids foi gerado o mapa de espessura saturada do SAA, mostrado na Figura 7.41.

As espessuras saturadas do SAA chegam a cerca de 250 metros, características das áreas onde o relevo é mais elevado. Na maior parte da região do corpo principal de afloramento das rochas do SAA a espessura situa-se entre 100 e 150 metros.

Tendo como base o mapa de espessura saturada, foi utilizado o aplicativo *Surface Volume* do programa ArcGis® para cálculo do volume rochoso saturado do SAA, cujo resultado alcançou 1.040 km³. Multiplicando-se pelo valor de porosidade eficaz de 10%, conforme estimada em publicação do CETEC (1981), baseada em teste de bombeamento de um poço na cidade de Presidente Olegário (MG), na região do SAA. Segundo utilização da equação abaixo, a reserva hídrica permanente para o SAA é de **104 km³**.

$$R_p = 1.040 \text{ Km}^3 \cdot 10\% = 104 \text{ Km}^3$$

O Quadro 7.14 resume as estimativas das reservas hídricas do SAA com base nestes dados.

QUADRO 7.14 – RESERVAS HÍDRICAS DO SAA

Área operacional SAA (Km ²)	Volume rochoso saturado (Km ³)	Recarga Potencial Direta (RPD) (km ³ /ano)	Reserva Permanente (km ³)	Reservas Totais (km ³)
15.485	1.040	3,44	104,00	107,40

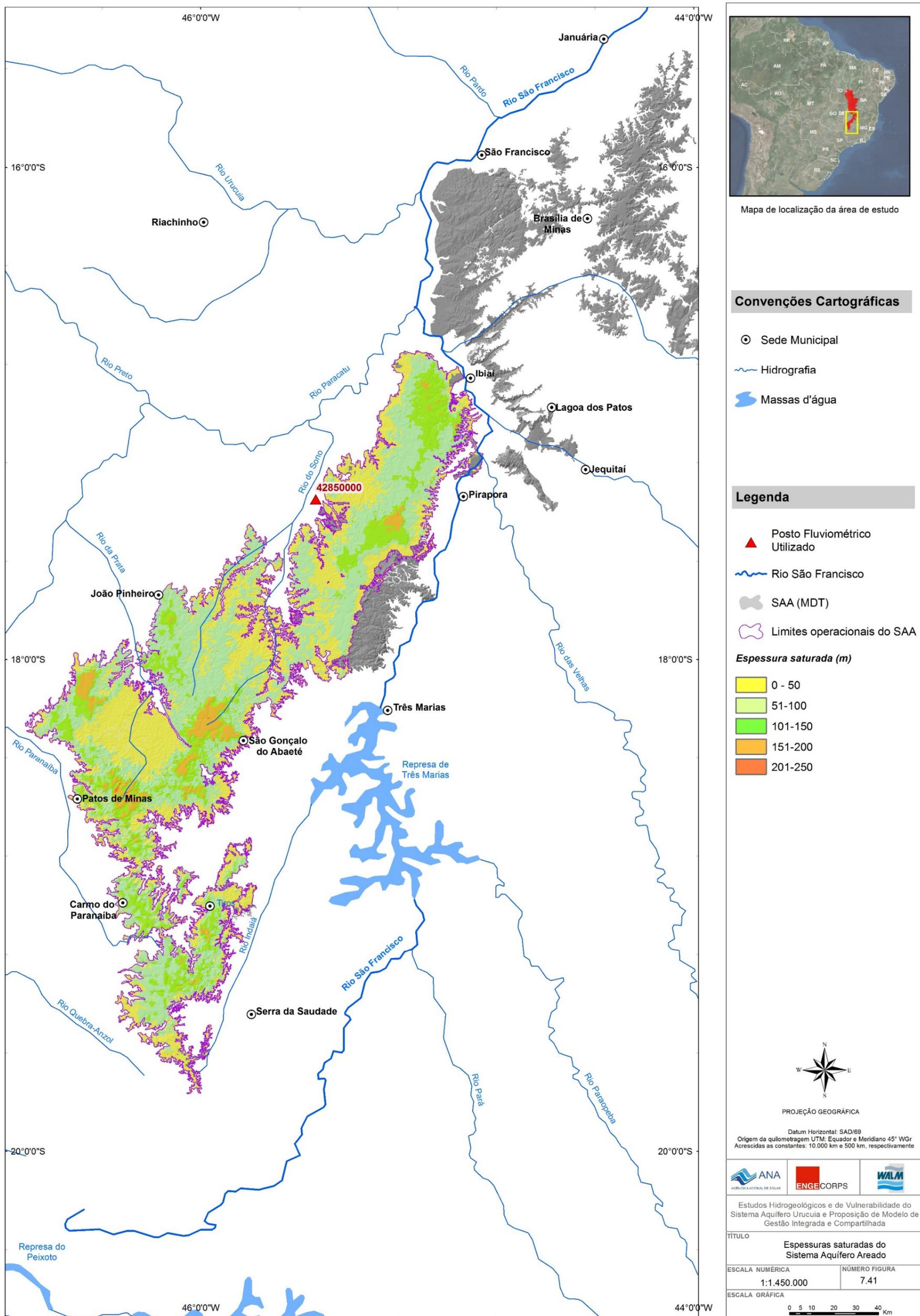


Figura 7.41 – Espessuras saturadas do Sistema Aquífero Areado.

7.2.3.2 Disponibilidades

A disponibilidade hídrica para o SAA também se baseou na mesma premissa adotada para o SAU. De forma a considerar-se uma visão mais sustentável e integrada, a disponibilidade hídrica adotada é uma parcela da Recarga Potencial Direta (RPD), ou seja, um coeficiente de sustentabilidade (Cs), aplicado à RPD resulta na Reserva Explotável (RE) que equivale à disponibilidade hídrica subterrânea.

O coeficiente de sustentabilidade (Cs) adotado para o SAA foi um percentual máximo recomendado para se explorar da Recarga Potencial Direta, com vistas a evitar efeitos adversos no SAA ou redução significativa das vazões de base dos rios a eles interconectados.

Para o Sistema Aquífero Areado, adotou-se o Cs de 0,4, baseando-se numa relação Q_{90}/Q_{50} de 0,32, obtida do posto fluviométrico Cachoeira das Almas (4285000). Assim, o valor da Reserva Potencial Explotável correspondente à disponibilidade hídrica subterrânea do SAA é de 1,37 Km^3/ano , conforme demonstrado abaixo.

$$RPE = 0,4 \cdot 3,44$$

$$RPE = 1,37 \text{ Km}^3/\text{ano}$$

7.2.4 *Potencialidades do Sistema Aquífero Areado (Zoneamento das Vazões Explotáveis)*

O conceito de “potencialidade” foi também utilizado conforme premissas utilizadas no SAU. Para estimar potencialidades do SAA foi utilizada equação adaptada de Cooper & Jacob (1946), conforme a equação abaixo.

$$Q = \frac{s \cdot 4\pi \cdot T}{\ln(2,25 \cdot T \cdot t / r^2 \cdot S_y)}$$

Onde: Q= vazão de extração (m³/h); s = rebaixamento admitido para o poço (m); T= transmissividade (m²/d); S_y ou ϕ_e = porosidade efetiva (%); r = raio do poço (m); e t = tempo de bombeamento (d).

Devido à escassez de dados hidrodinâmicos disponíveis, foram estimados para toda a sub-bacia Abaeté valores únicos de S_y e de K. Para S_y foi adotado o valor de 10% e para K o valor de 2,0 m/d (condutividade hidráulica menor do que a considerada para os sedimentos do Grupo Urucua, visto que o Grupo Areado apresenta características hidráulicas comparativamente mais pobres).

O raio do poço foi fixado em 0,1 m, neste estudo, para efeitos práticos. O tempo de bombeamento contínuo foi assumido em 10 anos (3.650 dias). O rebaixamento máximo admitido foi de 10% da espessura saturada, para período de 10 anos de exploração contínua. Este rebaixamento pode ser considerado moderado para aquíferos livres e adequado ao conceito de potencialidade definido em DAEE (2005).

Fixados alguns termos, a equação modificada de Cooper & Jacob (1946) pode ser expressa segundo a equação 15, na qual as variáveis independentes são somente T (transmissividade) e s (rebaixamento):

$$Q = \frac{s \cdot T \cdot 12,56}{\ln T + 15,58}$$

Como as potencialidades variam de um ponto a outro em função da espessura saturada do aquífero e esta, por sua vez, regula a transmissividade, os procedimentos para elaboração do mapa de distribuição das vazões potenciais, em ambiente ArcGis, foram:

- ✓ Elaboração de mapa de transmissividades do SAA: multiplicando-se o grid de espessura saturada (E) pelo valor da condutividade hidráulica (K) assumida no estudo, de modo que o resultado expressa a distribuição da transmissividade (T):

$$T = K \cdot E$$

- ✓ Elaboração de mapa correspondente a 10% da espessura saturada: multiplicando-se o grid de espessura saturada (E) por 0,1, obtendo-se grid correspondente a 10% da espessura saturada. Este grid representa o rebaixamento (termo “s” da equação) máximo admitido neste estudo e varia, proporcionalmente, de acordo com a espessura saturada total.
- ✓ Elaboração de mapa de distribuição de vazões explotáveis potenciais: utilizando-se operações de grids e operações matemáticas para solução da equação 2. Inicialmente, foi

elaborado o grid representativo do dividendo e o grid representativo do divisor da equação 2, em ambiente GIS Em seguida, realizou-se operação de divisão entre os grids e gerou-se um mapa preliminar de distribuição de vazões potenciais (Figura 7.42). O referido mapa indica as melhores áreas para captação em termos de quantidade e de qualidade.

- ✓ A insuficiência de dados hidrodinâmicos extraídos de cadastros de poços existentes na sub-bacia Abaeté não permitiu a aplicação de uma calibração entre as vazões potenciais e as vazões reais, a exemplo do que foi feito para o Sistema Aquífero Urucuia.

O mapa da Figura 7.42 indica que o SAA tem potencial para se extrair vazões que chegam a 240 m³/h. No entanto, na maior parte desse reservatório o potencial é de 50 m³/h, podendo variar de acordo com as características intrínsecas do aquífero. Na Figura 7.43 apresenta-se o mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Areado, associado com a potencialidade.

No que tange ao cálculo das distâncias mínimas entre poços, ou raio de influência do cone de rebaixamento calculadas para o SAA, este seguiu o mesmo método e considerações utilizadas no SAU. Segundo utilizado nesta avaliação a estimativa de interferências com outros usuários, tomou-se como base a formulação simplificada de Jacob para fluxo transiente, adaptada para aquíferos livres (Custódio & Llamas, 1996), conforme equação abaixo:

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{T \cdot t}{\varnothing e}}$$

Onde: R= raio de interferência (m); T= transmissividade (m²/d); Øe= porosidade efetiva; t= tempo de bombeamento (dias).

Considerando que ocorra estabilização após período de 24 horas de bombeamento, as distâncias mínimas entre poços com base no raio de influência e nas características hidráulicas do Sistema Aquífero Areado são aquelas apresentadas no Quadro 7.15. Com base nos exemplos simulados, para valores de espessura saturada entre 100 e 200 metros, as interferências entre poços podem variar entre 67 e 95 metros.

QUADRO 7.15 - ESTIMATIVA DO RAIOS DE INFLUÊNCIA NO SAA

<i>Raios de Influência</i>					
<i>K (m/d)*</i>	<i>Espessura saturada (m)</i>	<i>Transmissividade (m²/d)</i>	<i>Tempo (dia)</i>	<i>Øe</i>	<i>R (m)</i>
2,0	100	200	1	0,10	67,08
2,0	150	300	1	0,10	82,16
2,0	200	400	1	0,10	94,87

* K = condutividade hidráulica do SAA (valor estimado).

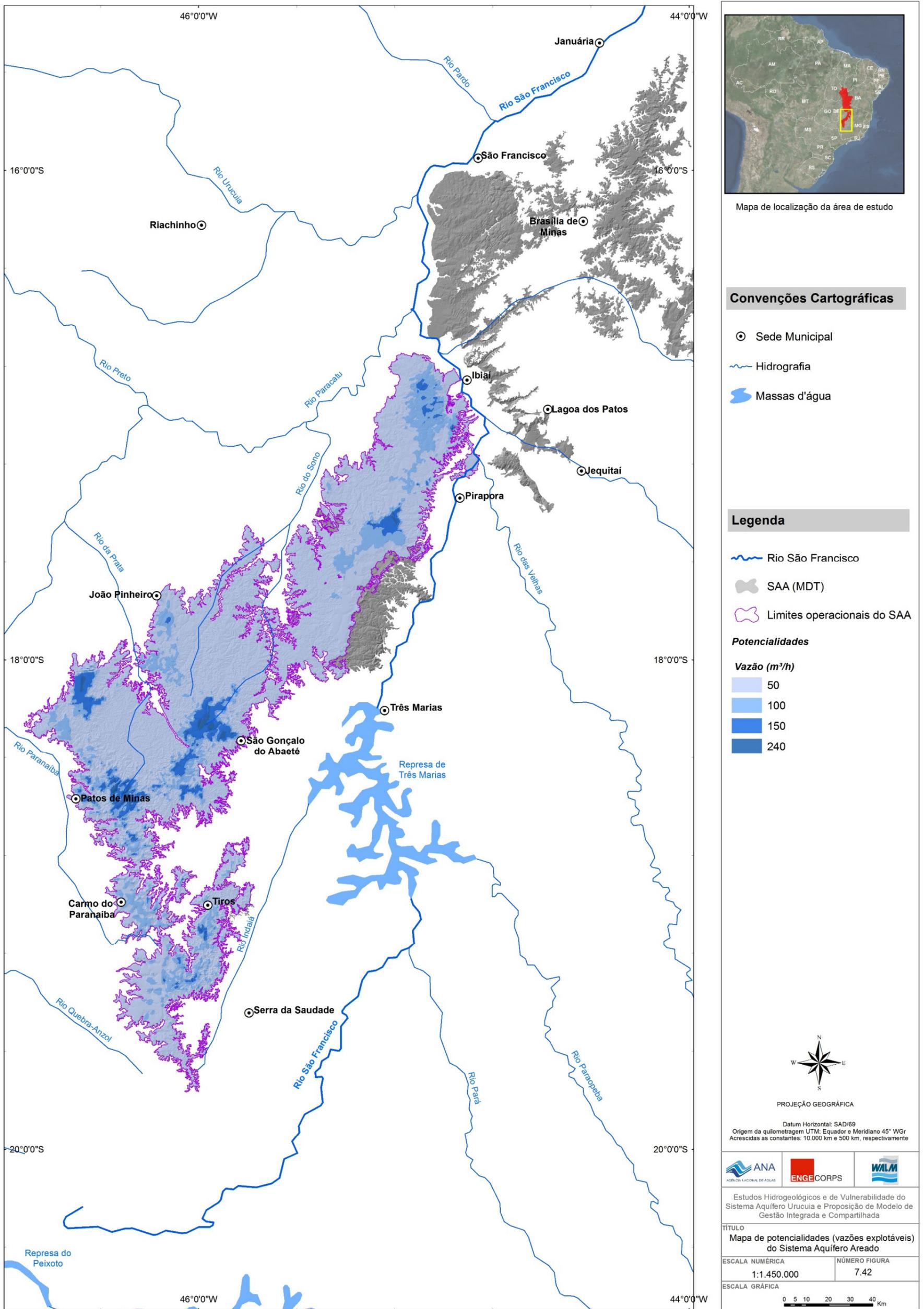


Figura 7.42 – Mapa de potencialidades (vazões exploráveis) do Sistema Aquífero Areado.

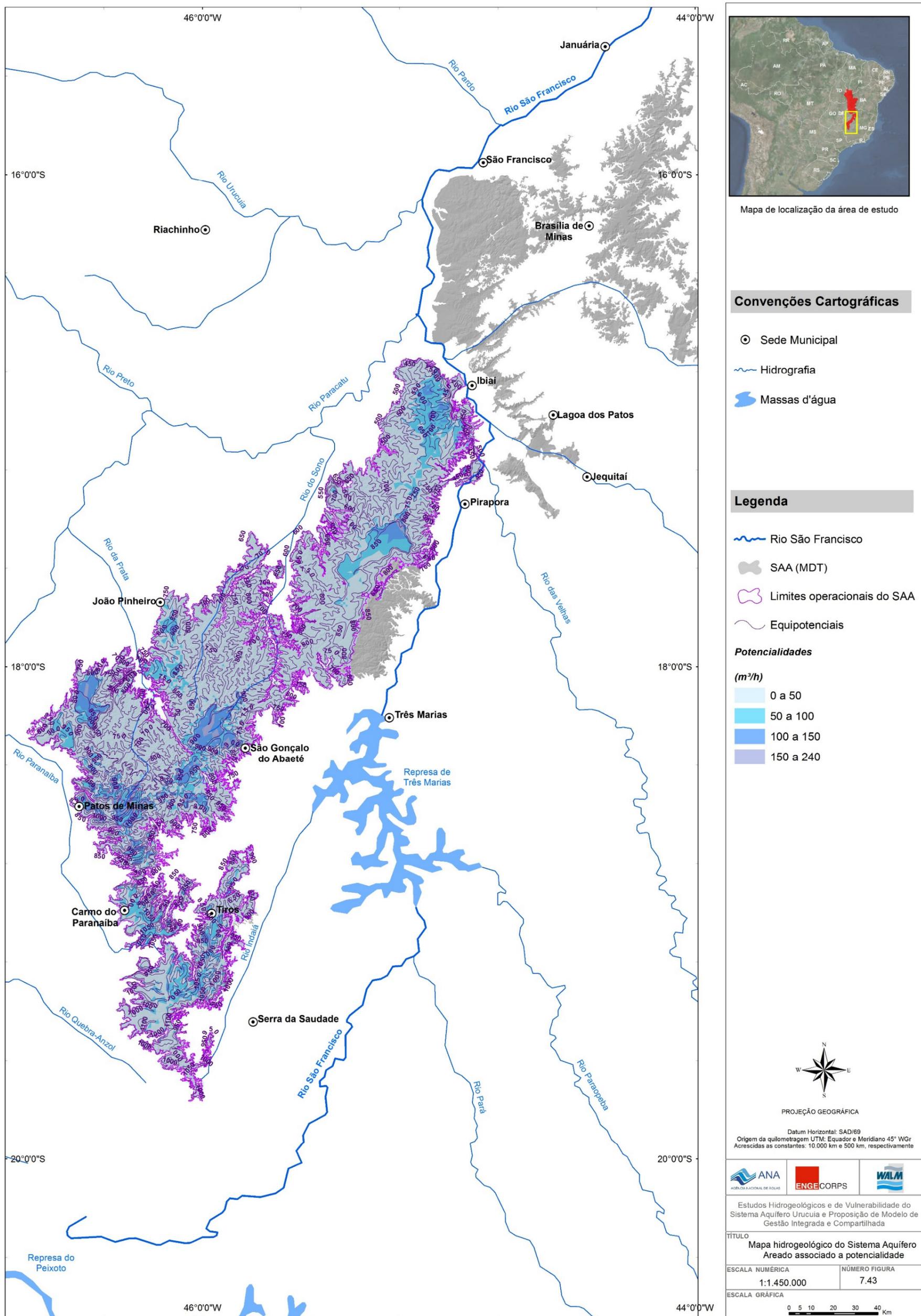


Figura 7.43 – Mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Areado associado a potencialidade.

8. HIDROGEOQUÍMICA, VULNERABILIDADE E RISCOS DE CONTAMINAÇÃO

8.1 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS DO SAU E SAA

8.1.1 Rede de Amostragem de Águas Subterrâneas e Parâmetros Analisados

Foram realizadas duas campanhas de amostragens de águas subterrâneas de poços tubulares e nascentes na região dos Sistemas Aquífero Urucua e Areado. Durante a primeira campanha, realizada nos meses de julho e agosto de 2012, foram coletadas 203 amostras, sendo 22 amostras de nascentes¹, 56 amostras de poços rasos (até 120 m), 61 amostras de poços profundos (maior que 120 m) e 64 poços sem dados de profundidade (Figura 8.1).

A segunda campanha ocorreu nos meses de dezembro de 2012 a abril de 2013, período em que foram coletadas 198 amostras, sendo 20 amostras de nascentes, 56 amostras de poços rasos (até 120 m), 59 amostras de poços profundos (maior que 120 m) e 63 poços sem dados de profundidade (Figura 8.1). Os poços U97, U111 e U203 não foram amostrados, pois o acesso aos locais não foi autorizado, e também não foi possível substituir esses pontos, uma vez que não existiam pontos de coleta próximos. Os pontos U9 e U63 foram desativados, porém foram substituídos e amostrados pontos próximos. As análises prestaram-se à caracterização hidroquímica e à elaboração de modelo de evolução geoquímica para as águas do SAU e do SAA.

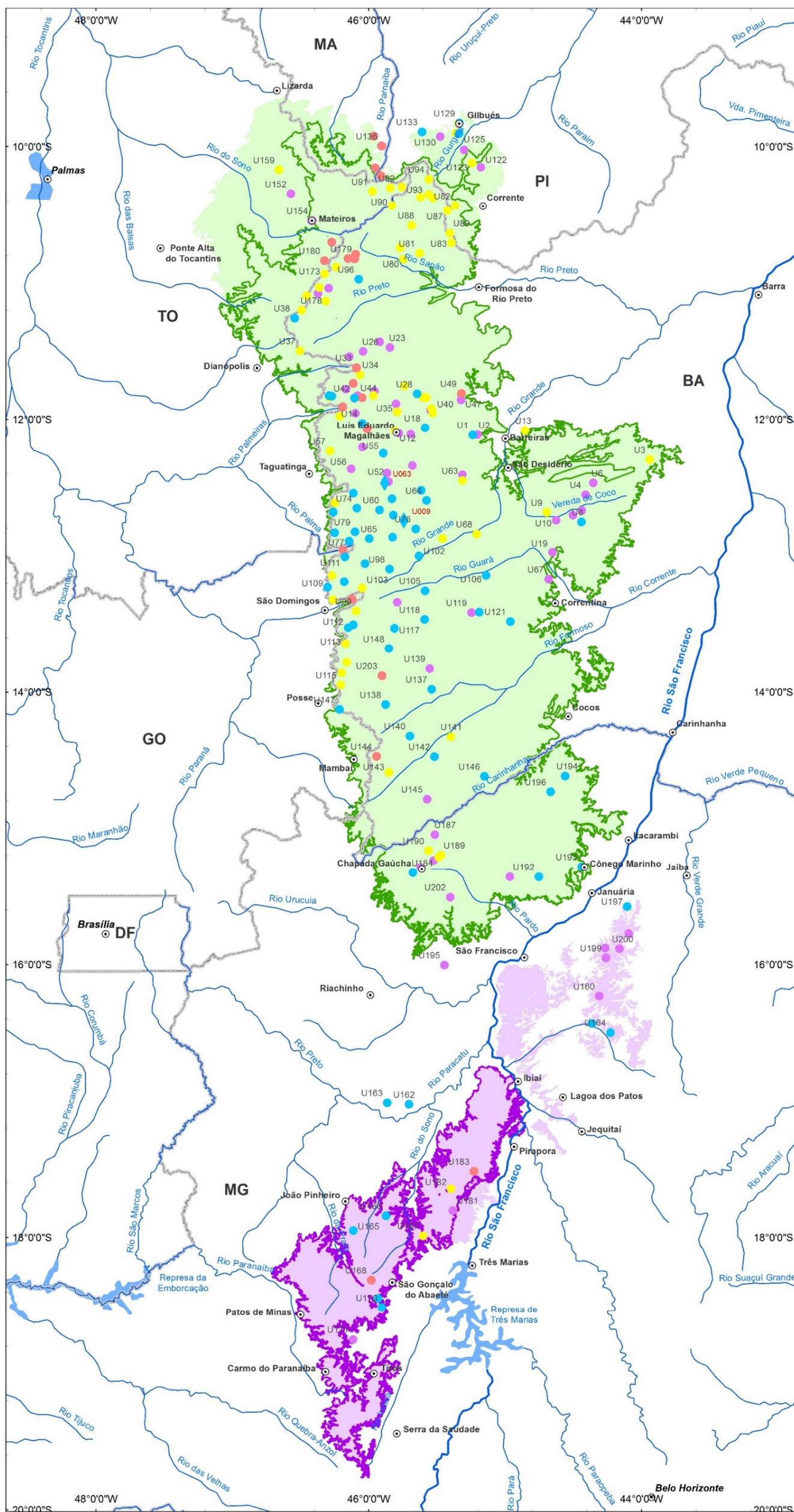
Os parâmetros analisados na 1ª e 2ª campanhas, totalizando 44, estão relacionados a seguir.

Temperatura, Condutividade, pH, HCO ₃ , CO ₃ , Cor, Turbidez, STD, Dureza, ClO ₂ ⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , Br ⁻ , Acetato, C ₂ O ₄ ²⁻ , Li, Na, NH ₄ , N-NH ₃ , Ka, Al, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Si, Sn, Sr, V, Zn

Exceto a temperatura, medida em °C, a condutividade, em µS/cm, a cor, em CU e a turbidez, em NTU, todos os demais parâmetros foram medidos em mg/L.

Na segunda campanha de amostragem, além das amostras coletadas para análises físico-químicas, também foram coletadas 40 amostras para análises bacteriológicas; 59 amostras para determinação de agrotóxicos; 30 amostras para análises de BTEX e índices de fenóis; 43 amostras para determinações de metais pesados; 40 amostras para análises de isótopos estáveis de oxigênio (δ¹⁸O) e hidrogênio (δD); 14 amostras para análises de isótopos radioativos de carbono (¹⁴C); e 25 amostras para determinação de trítio (³H). Todas as amostragens seguiram os padrões determinados para as coletas e foram encaminhadas para as análises especificadas acima.

¹ A amostra U50 (nascente) não foi plotada nos mapas devido à inconsistência das coordenadas levantadas em campo, mas os dados foram considerados nas avaliações.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU
- SAA
- Limites operacionais do SAU
- Limites operacionais do SAA

Pontos de amostragem

(Campanhas 1 e 2)

- Nascente
- Poço > 120m
- Poço < ou = 120m
- Poços sem dados

Pontos de amostragem

(Subst. Campanha 2)

- ◆ U009
- ◆ U063

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGE CORPS
 WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Localização dos pontos amostrados - Campanhas 1 e 2

ESCALA NUMÉRICA
 1:3.000.000

NÚMERO FIGURA
 8.1

ESCALA GRÁFICA
 0 10 20 40 60 80 Km

Figura 8.1 - Localização dos pontos amostrados - Etapas 1 e 2.

8.1.2 Métodos de Análise e de Tratamento de Dados Hidroquímicos

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, Campus de Rio Claro (SP). Tais análises foram desenvolvidas com base no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (EATON et al., 2005).

Para a classificação dos tipos hidroquímicos foram utilizados os diagramas de *Stiff* e de *Piper*. Para a visualização da distribuição espacial dos principais cátions, ânions, pH e condutividade elétrica foram gerados mapas de isovalores, com o auxílio do *software ArcGis*. A especiação e a modelagem hidroquímica foram obtidas com o uso do *software PHREEQC* (Parkhurst e Apello, 1999).

Para avaliação de possível correlação/similaridade entre as águas de dois sistemas aquíferos, ou similaridades entre amostras de um mesmo sistema, foi aplicada a análise multivariada pelo método de agrupamento (*cluster analysis*), com auxílio do aplicativo XLSTAT.

8.1.3 Interpretação dos Resultados das Análises

As análises químicas contemplaram a quantificação dos íons maiores presentes em solução na água subterrânea. Considerando que as soluções são eletricamente neutras, uma forma de avaliar a representatividade dos resultados obtidos é a verificação do balanço de cargas negativas e positivas. Para o balanço de carga foram utilizados os resultados analíticos convertidos em meq/L, conforme Custódio & Llamas (1996).

A maioria das amostras coletadas na 1^a. ou 2^a. campanhas apresentou balanço de carga com até 20% de erro, sendo que 50% das amostras ficaram com erros abaixo de 10%. Os erros maiores que 20% podem ser resultado da baixa concentração iônica, que aumenta o erro analítico devido a restrições dos limites de detecção dos equipamentos, sendo esta a hipótese mais provável; pode ainda indicar possível precipitação de substâncias antes da análise, ou a não inclusão de algumas substâncias presentes dentre os parâmetros quantificados.

A classificação hidroquímica das águas amostradas foi feita com auxílio dos diagramas de *Piper* e *Stiff*, admitindo-se valor zero para íons que ficaram com teor abaixo do limite de detecção do método de análise empregado. Segundo o diagrama de Piper (Figura 8.2), a classificação das águas pode ser assim resumida:

- ✓ As águas amostradas nas **nascentes**, na primeira campanha, são predominantemente bicarbonatadas sódicas (76,2%), depois aparecem as cloretadas sódicas (14,3%) e as bicarbonatadas cálcicas (9,5%). Na segunda campanha de amostragem, as bicarbonatadas sódicas permanecem como maioria (50%), em seguida aparecem as cloretadas sódicas (30%), as bicarbonatadas cálcicas (15%) e apenas uma amostra classificada como sulfatada cálcica (5%).
- ✓ As amostras dos **poços rasos (≤ 120 m)**, da primeira campanha de amostragem, são classificadas, em sua maioria, como bicarbonatadas sódicas (44,6%) e bicarbonatadas cálcicas (44,6%), e o restante como cloretadas sódicas (10,8%). As amostras da segunda campanha são classificadas, predominantemente, como bicarbonatadas cálcicas (50%) e

bicarbonatadas sódicas (34%), e em menor quantidade aparecem as cloretadas sódicas (16%).

- ✓ As amostras de águas dos **poços profundos (>120 m)**, coletadas na primeira campanha, são classificadas como bicarbonatadas sódicas (70,5%), bicarbonatadas cálcicas (18%), cloretadas sódicas (10%), e apenas uma amostra (U9) é classificada como sulfatada cálcica. Nas amostragens realizadas na segunda campanha, as águas são classificadas predominantemente como bicarbonatadas sódicas (76,3%), em seguida aparecem as bicarbonatadas cálcicas (15,2%) e as cloretadas sódicas (8,5%).
- ✓ As amostras coletadas em **poços sem dados de profundidade**, referentes à primeira campanha de amostragem, são classificadas predominantemente como bicarbonatadas sódicas (56,2%), seguidas pelas bicarbonatadas cálcicas (34,4%) e cloretadas sódicas (9,4%). Na segunda campanha, aparecem em maioria as bicarbonatadas cálcicas (48%), seguidas pelas bicarbonatadas sódicas (36,5%) e cloretadas sódicas (14%), sendo apenas uma amostra classificada como sulfatada cálcica (1,5%).

No geral, as amostras de água dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado foram classificadas, predominantemente, como bicarbonatadas sódicas (Figuras 8.3 e 8.4).

Observa-se nos diagramas de *Stiff* (Figuras 8.3 e 8.4) as diferenças de concentrações iônicas das amostras. Na borda oeste e porção central do SAU, as amostras são menos salinas; enquanto que nas bordas leste, nordeste e sudeste da área de ocorrência do SAU e na região do SAA as concentrações aumentam. No primeiro caso, provavelmente devido à influência do Aquífero Bambuí ou de outras unidades aquíferas subjacentes, e no caso da região do SAA provavelmente pela sua própria composição mais salina. Nota-se que algumas amostras coletadas em poços rasos apresentam valores de bicarbonato e de cálcio relativamente maiores em relação ao padrão geral, muito provavelmente em decorrência de mistura com águas do Aquífero Bambuí. O conhecimento da posição das seções filtrantes desses poços permitiria dirimir estas dúvidas.

As Figuras 8.3 e 8.4 também permitem verificar que amostras de poços rasos, profundos e de nascentes localizadas na região do SAU não apresentam diferenças hidroquímicas expressivas, com exceção das amostras da borda leste que devem representar mistura de águas de diferentes aquíferos. Assim, pode-se concluir que as águas do SAU não variam significativamente com a profundidade.

Observa-se na Figura 8.5 que as amostras classificadas como bicarbonatadas sódicas estão concentradas nas bordas oeste e norte do SAU. As amostras classificadas como bicarbonatadas cálcicas são mais expressivas nas porções leste da região do SAU e do SAA. As amostras classificadas como cloretadas sódicas são mais comuns na porção norte da região de ocorrência do SAU. As amostras dos poços U127, U128 e U129 apresentam valores de nitrato acima do limite permitido pela Portaria Nº 2914/2011, do Ministério da Saúde, conforme verificado nas duas etapas de amostragens. Esses valores de nitrato devem-se provavelmente à contaminação antrópica. Os três poços citados estão situados no município de Gilbués. As três amostras classificadas como sulfatadas cálcicas – U9 (1ª. etapa) e U1 e U144 (2ª. etapa) – possuem baixas concentrações iônicas, podendo ser melhor classificadas como águas mistas.

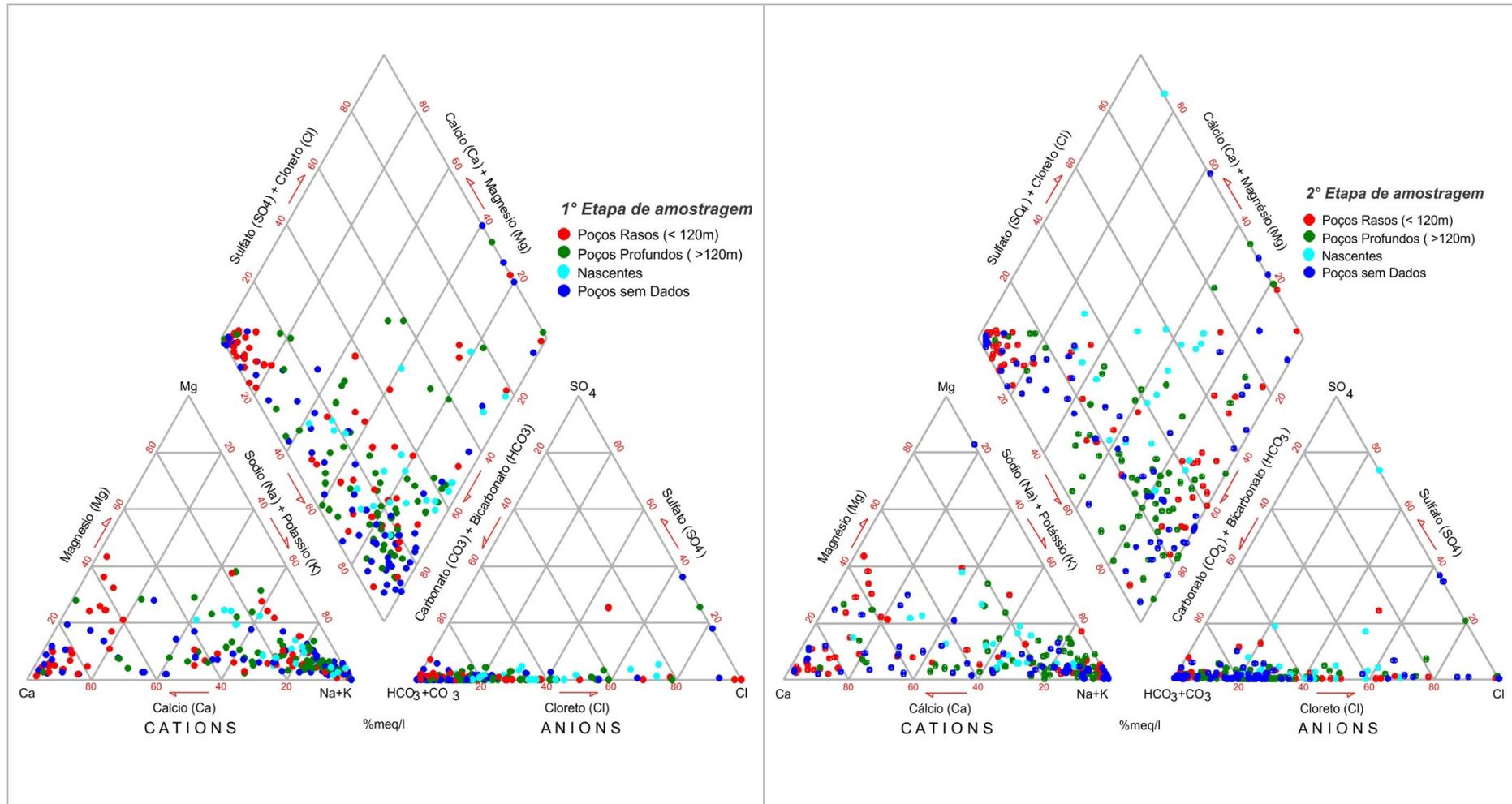


Figura 8.2 - Diagramas de Piper para amostras de água do SAU e SAA - Etapas 1 e 2

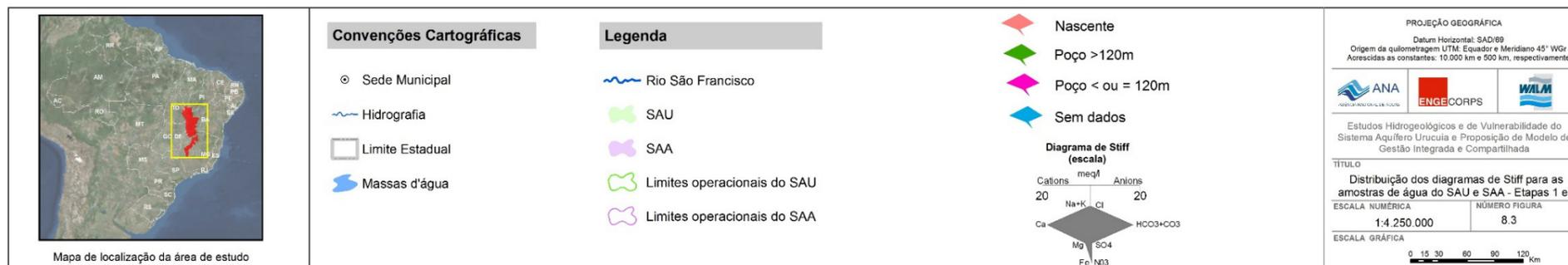
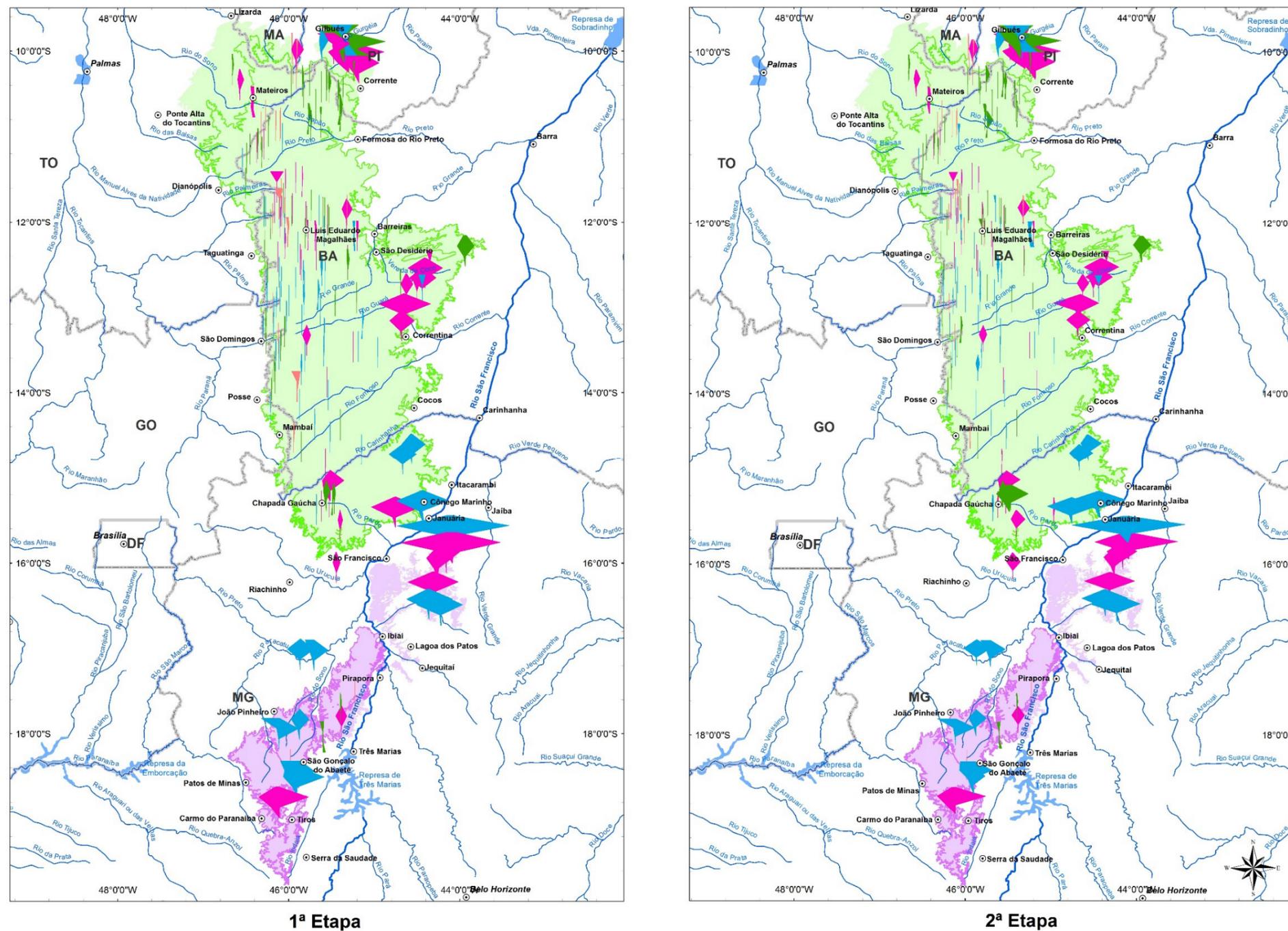


Figura 8.3 - Distribuição dos diagramas de Stiff para as amostras de água do SAU e SAA - Etapas 1 e 2.

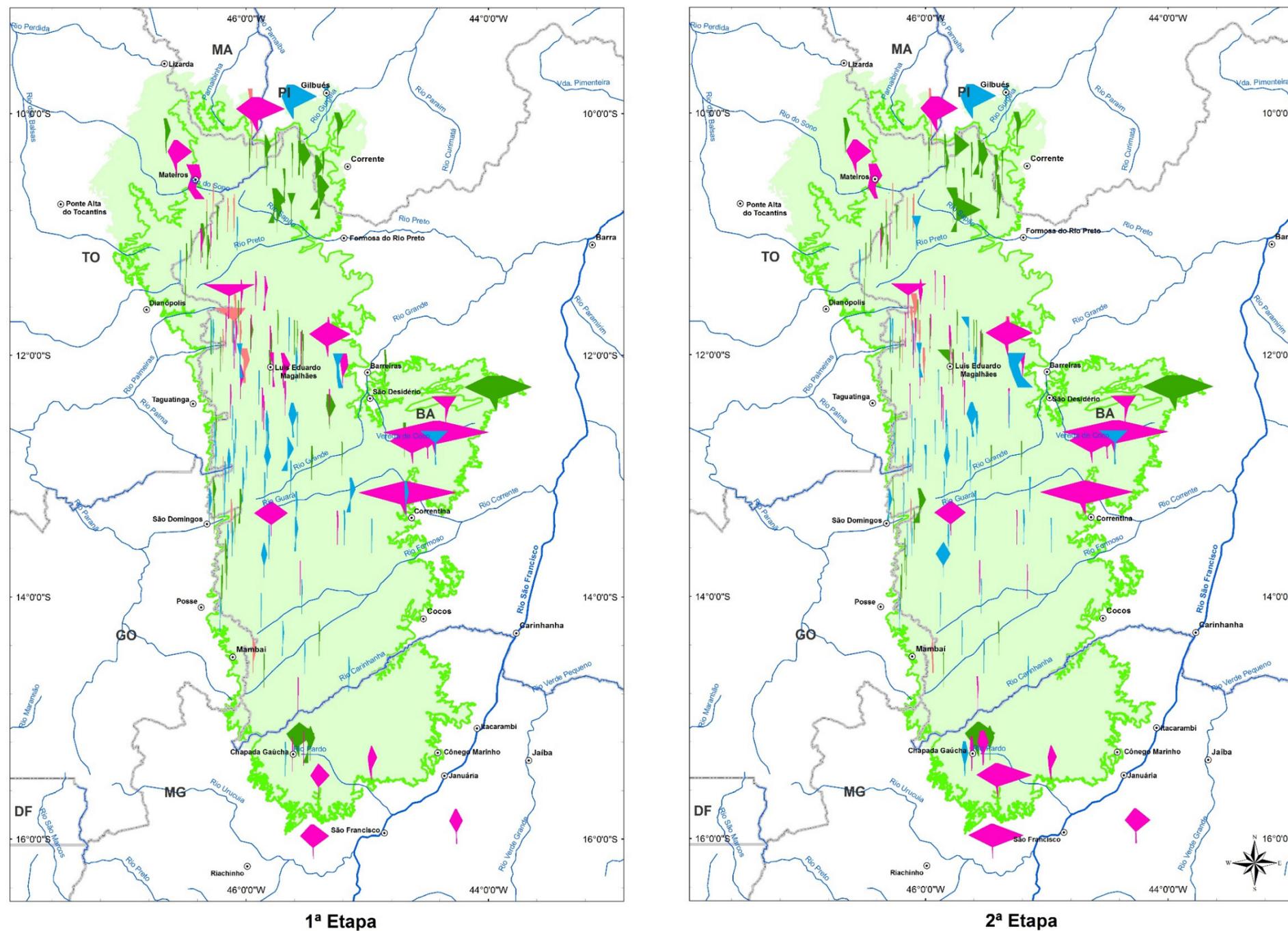
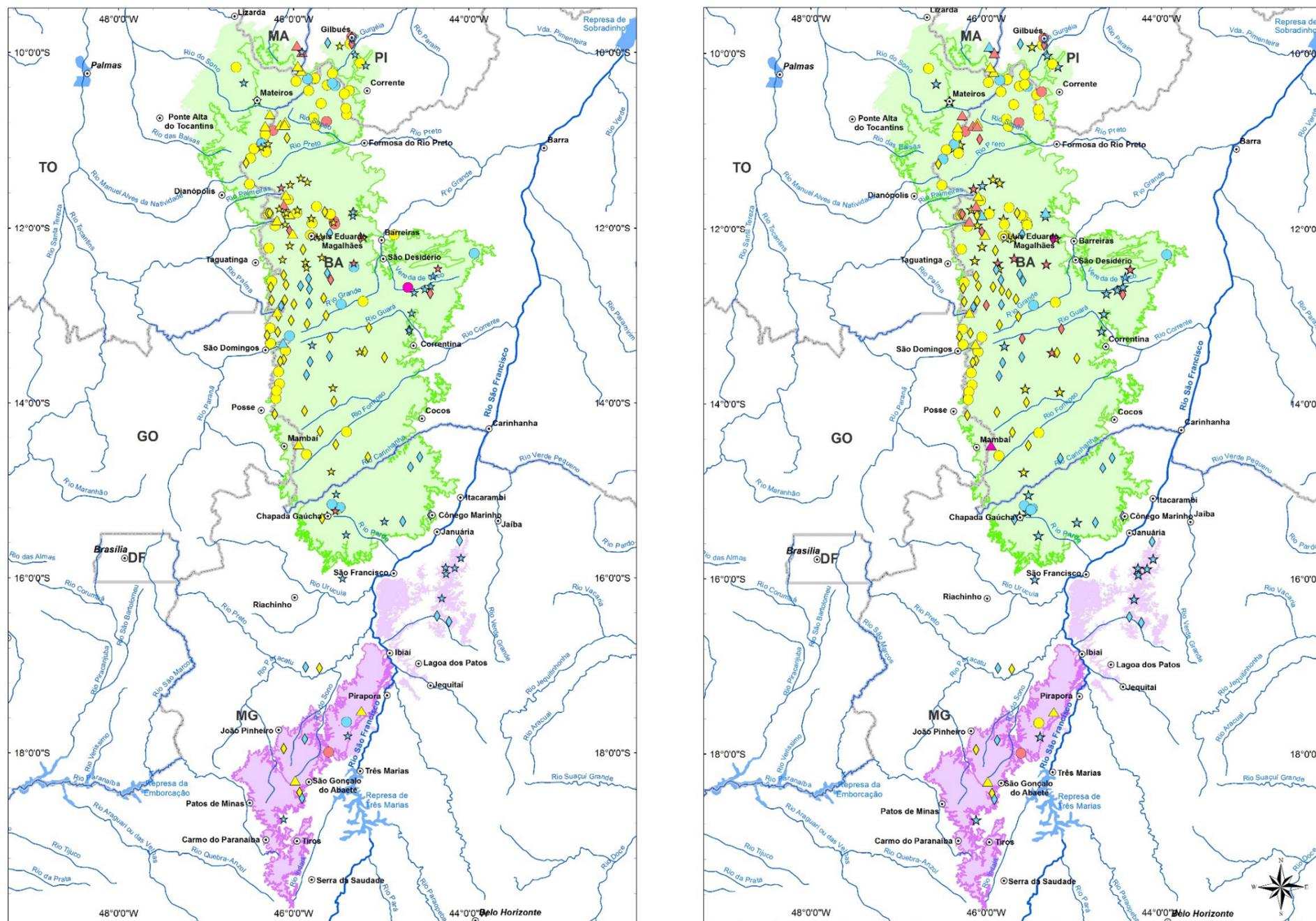


Figura 8.4 - Detalhe da distribuição dos diagramas de Stiff para as amostras do SAU com condutividades elétricas menores do que 200 µS/cm - Etapas 1 e 2.



1ª Etapa

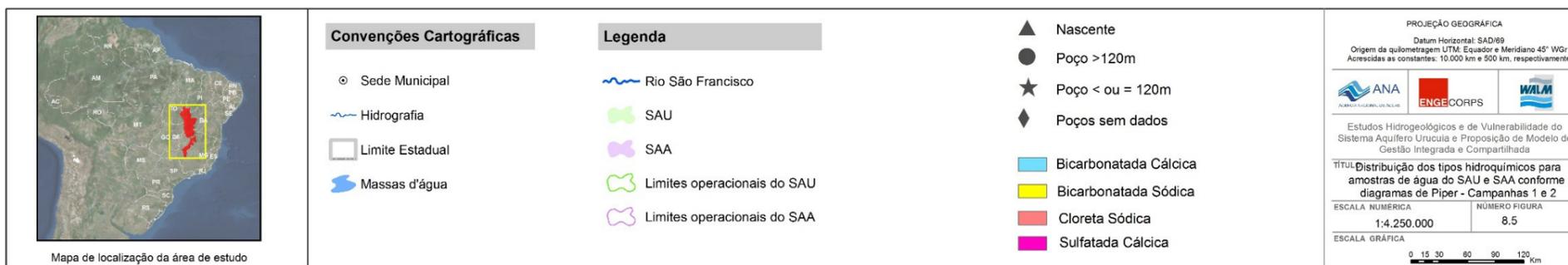


Figura 8.5 - Distribuição dos tipos hidroquímicos para amostras de água do SAU e SAA, conforme diagramas de Piper - Etapas 1 e 2.

8.1.4 Análise Estatística

8.1.4.1 Análise Comparativa de Valores Médios (Mediana) de Resultados Provenientes de Distintas Origens de Amostras

Neste item, é apresentada uma análise comparativa entre resultados médios dos diferentes parâmetros físico-químicos, referentes às amostras realizadas nas nascentes e poços superficiais (≤ 120 m), nascentes e poços profundos (> 120 m) e entre poços superficiais (≤ 120 m) e poços profundos (> 120 m), para cada uma das campanhas de amostragem. Análises comparativas entre campanhas são apresentadas no item seguinte.

Para essa análise, foi utilizado o teste não paramétrico pelo método de Mann-Whitney, visto que se trata da comparação de médias de duas populações (parâmetros físico-químicos dos poços e nascentes), cujas amostras são independentes e com variáveis contínuas. Os resultados dos testes realizados podem ser assim resumidos:

- ✓ Amostras das nascentes e poços profundos apresentam resultados médios de parâmetros físico-químicos (com exceção do Mg, Fe e Si) estatisticamente iguais;
- ✓ Amostras das nascentes e poços superficiais apresentam resultados médios de Cl, SO₄ e NO₃ estatisticamente iguais;
- ✓ Amostras dos poços superficiais e profundos apresentam resultados médios de Fe estatisticamente iguais.

8.1.4.2 Análise Comparativa de Valores Médios (Mediana) entre Resultados da Primeira e Segunda Campanhas de Amostragem

De maneira semelhante ao item anterior, a comparação foi abordada mediante a estatística indutiva, com o emprego de testes de hipóteses. O procedimento foi similar, com auxílio do teste não paramétrico pelo método de Mann-Whitney, para amostras independentes e com variáveis contínuas.

Em síntese, pode-se inferir que as medições dos parâmetros físico-químicos da primeira e segunda campanhas são estatisticamente iguais, com exceção de HCO₃ em nascentes e poços profundos (> 120 m).

8.1.4.3 Análise Estatística Multivariada (Análise de Agrupamentos)

Conforme mencionado, não foram constatadas diferenças significativas nas amostras coletadas nas nascentes e em poços de diferentes profundidades, com exceção daquelas coletadas na borda leste da área de ocorrência do SAU, onde há provável influência de outras unidades aquíferas. Há também um número expressivo de amostras que foram coletadas em poços onde não há dados de profundidade. Com isso, optou-se por uma análise estatística utilizando todas as amostras coletadas, de modo a permitir uma melhor interpretação dos resultados hidroquímicos.

Para avaliação de possível correlação/similaridade entre as águas coletadas nas duas campanhas de amostragens na área de estudo, foi aplicada a análise multivariada com os métodos de agrupamento (*cluster analysis*), com o auxílio do aplicativo XLSTAT. A partir dos dendrogramas obtidos, foram identificados três grupos (**1**, **2** e **3**) distintos de água:

- ✓ **GRUPO 1** – Essas águas são pouco mineralizadas, com condutividades elétricas menores que 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Predomina o ânion HCO_3 , ainda que em baixa concentração (até 76,5 mg/L) e o cátion Si (média de 5,7 mg/L). Em geral, mantêm a relação $\text{Si} > \text{Na} > \text{Ca}$. Distribuem-se por quase toda extensão do aquífero (Figura 8.6) e podem ser consideradas representativas do Sistema Aquífero Urucuia ou do Sistema Aquífero Areado com menos íons dissolvidos;
- ✓ **GRUPO 2** – Águas compostas, provavelmente, por misturas de águas de unidades aquíferas inferiores ou do Aquífero Bambuí. Estão neste grupo 24 amostras, sendo que 11 amostras estão fora da área que abrange os Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado (Figura 8.6). Estas águas possuem condutividade elétrica variando de 166 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 510 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os íons predominantes são HCO_3 (média de 165 mg/L) e Ca (média de 46 mg/L). Em geral, mantêm a relação $\text{Ca} > \text{Si} > \text{Na}$;
- ✓ **GRUPO 3** – Representado apenas por duas amostras (U197 e U198) provenientes de poços que provavelmente exploram o Aquífero Bambuí. São amostras com alta condutividade elétrica ($> 800 \mu\text{S}/\text{cm}$), HCO_3 acima de 300 mg/L e Ca ($> 130 \text{ mg/L}$).

As águas representativas do Sistema Aquífero Urucuia (Sub-bacia Urucuia, parte norte da área), reunidas no Grupo 1 (156 amostras da primeira campanha e 153 da segunda campanha), foram analisadas em separado e reagrupadas novamente. A partir dos dendrogramas obtidos, foram identificados três subgrupos distintos, denominados **A**, **B** e **C**.

- ✓ **SUBGRUPO A** – A maioria das amostras analisadas está reunida neste subgrupo (Figura 8.7). Suas águas são pouco mineralizadas, com concentração média de sólidos totais dissolvidos de 8,8 mg/L e predomínio dos íons HCO_3 e Si, ainda que em baixas concentrações (médias de 2,04 mg/L e 5,2 mg/L, respectivamente). São classificadas, predominantemente, como **bicarbonatadas sódicas** e concentram-se na borda oeste e porção central da área do SAU;
- ✓ **SUBGRUPO B** – Somente quatro amostras de água estão reunidas neste subgrupo (Figura 8.7). Estas águas possuem concentração média de sólidos totais dissolvidos de 88 mg/L e são classificadas como **bicarbonatadas cálcicas**. Provavelmente, constituem misturas de águas de outros sistemas aquíferos, como por exemplo, do Aquífero Bambuí;
- ✓ **SUBGRUPO C** – Amostras de água deste subgrupo (30 amostras) estão concentradas na metade norte e extremo sul da área do SAU (Figura 8.7). São águas pouco mineralizadas, com concentração média de sólidos totais dissolvidos de 33 mg/L, e classificadas como **bicarbonatadas cálcicas** e **bicarbonatadas sódicas**. O silício é o cátion predominante, com concentração média de 5,5 mg/L, e o ânion predominante é o bicarbonato, com concentração média de 12 mg/L.

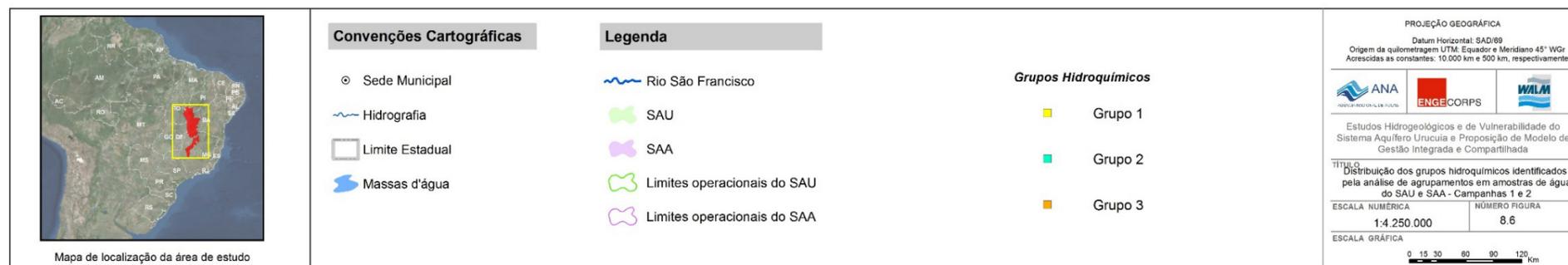
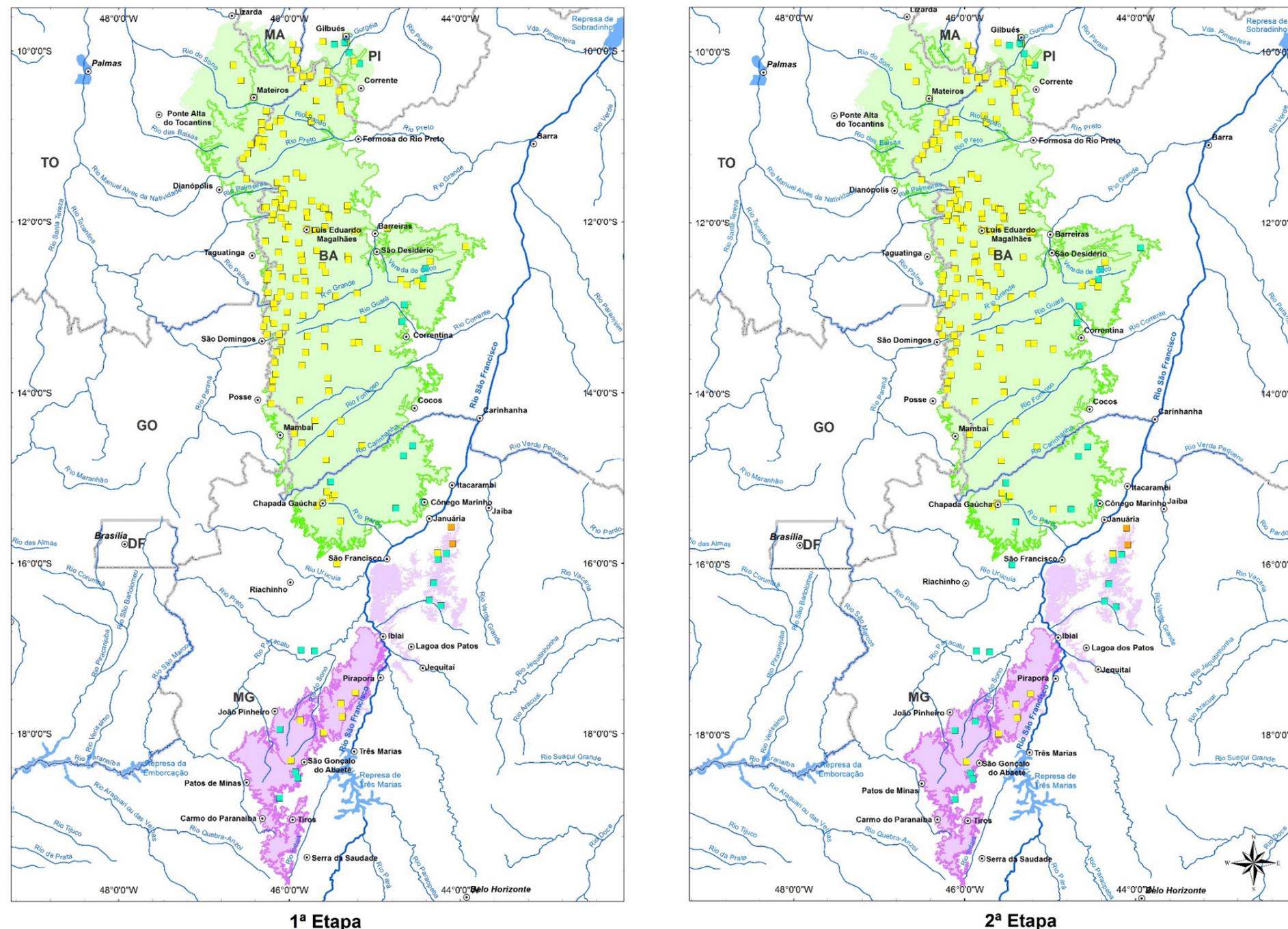
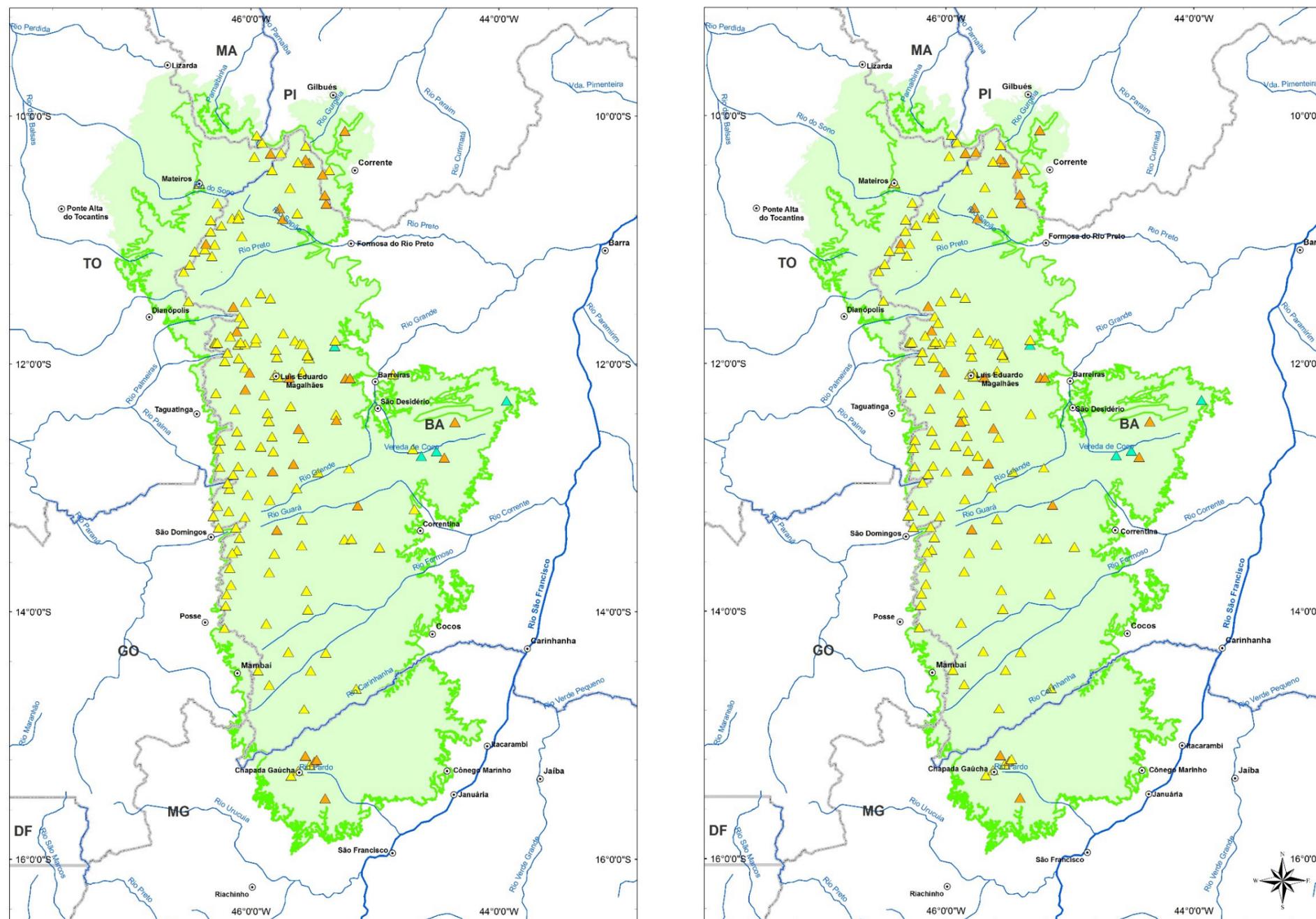


Figura 8.6 - Mapa de distribuição dos grupos hidroquímicos, identificados pela análise de agrupamentos em amostras de água do SAU e SAA - Etapas 1 e 2.



1ª Etapa

2ª Etapa



Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU
- Limites operacionais do SAU

Subgrupos Hidroquímicos

- ▲ Grupo A
- ▲ Grupo B
- ▲ Grupo C

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA
 Datum Horizontal: SAD89
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGECORPS
 WLM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO: Distribuição dos subgrupos hidroquímicos do Grupo 1 identificados pela análise de agrupamentos de amostras localizadas no SAU - Campanhas 1 e 2

ESCALA NUMÉRICA: 1:3.000.000 NÚMERO FIGURA: 8.7

ESCALA GRÁFICA: 0 10 20 40 60 80 km

Figura 8.7 - Mapa de distribuição dos subgrupos hidroquímicos do Grupo 1, identificados pela análise de agrupamentos de amostras localizadas no SAU - Etapas 1 e 2.

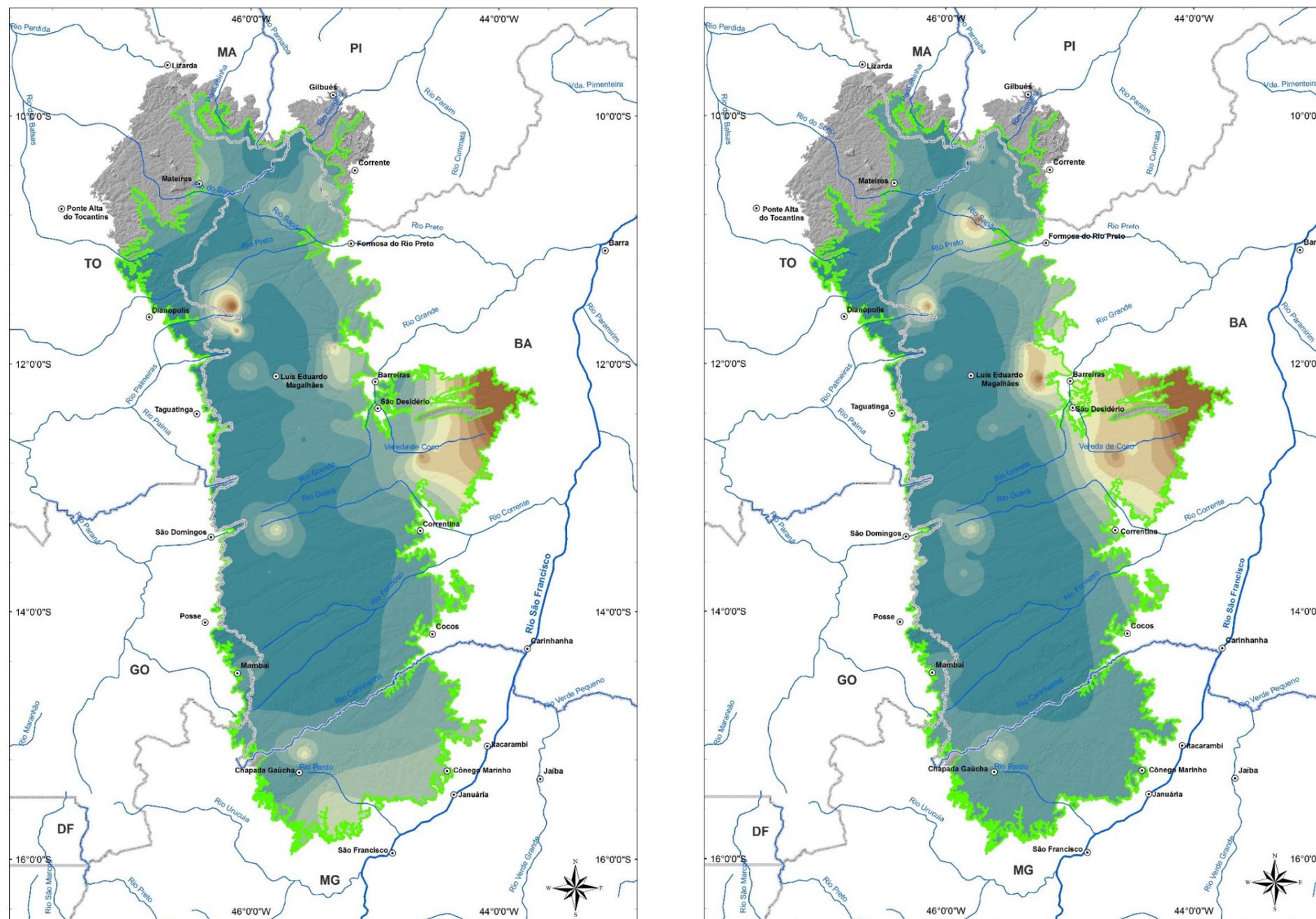
8.1.5 Mapas de Zoneamento Hidrogeoquímico

Os resultados dos principais parâmetros físico-químicos obtidos neste estudo foram analisados quanto à sua distribuição espacial, por meio de mapas de isovalores gerados pelo programa *ArcGis*. Foram utilizadas somente as amostras enquadradas no Grupo 1, localizadas na área de ocorrência do SAU, que reúne a maioria das águas representativas dos aquíferos estudados. As principais concentrações iônicas foram expressas em mg/L, e a condutividade elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica, pH, alcalinidade (HCO_3), sódio, cálcio, cloreto, nitrato, N-NH_3 , sulfato, ITB e SAR.

Os menores valores de condutividade elétrica estão distribuídos próximos à borda oeste da área estudada, onde estão as maiores espessuras do SAU (Figura 8.8). Já os maiores valores situam-se na porção leste da área e devem estar relacionados a amostras de água com contribuição do Aquífero Bambuí.

Os mapas de isovalores de pH (Figura 8.9) mostram tendência de aumento do pH na direção das bordas leste e sul da sub-bacia Urucuia, com alguns valores relativamente mais elevados em pontos isolados no âmbito do aquífero. A distribuição dos valores de pH mantém correlação positiva com a distribuição dos valores de alcalinidade apresentados na Figura 8.10. O aumento de pH na direção dos bordos leste e sul do aquífero está provavelmente relacionado à mistura com águas provenientes do Aquífero Bambuí.

O mesmo acontece com a alcalinidade, que aumenta nas bordas leste e sul da área estudada, com pontos anômalos na borda oeste da sub-bacia (U107 e U190). Não houve diferenças expressivas dos valores de pH e alcalinidade (HCO_3) nas duas etapas de coletas.

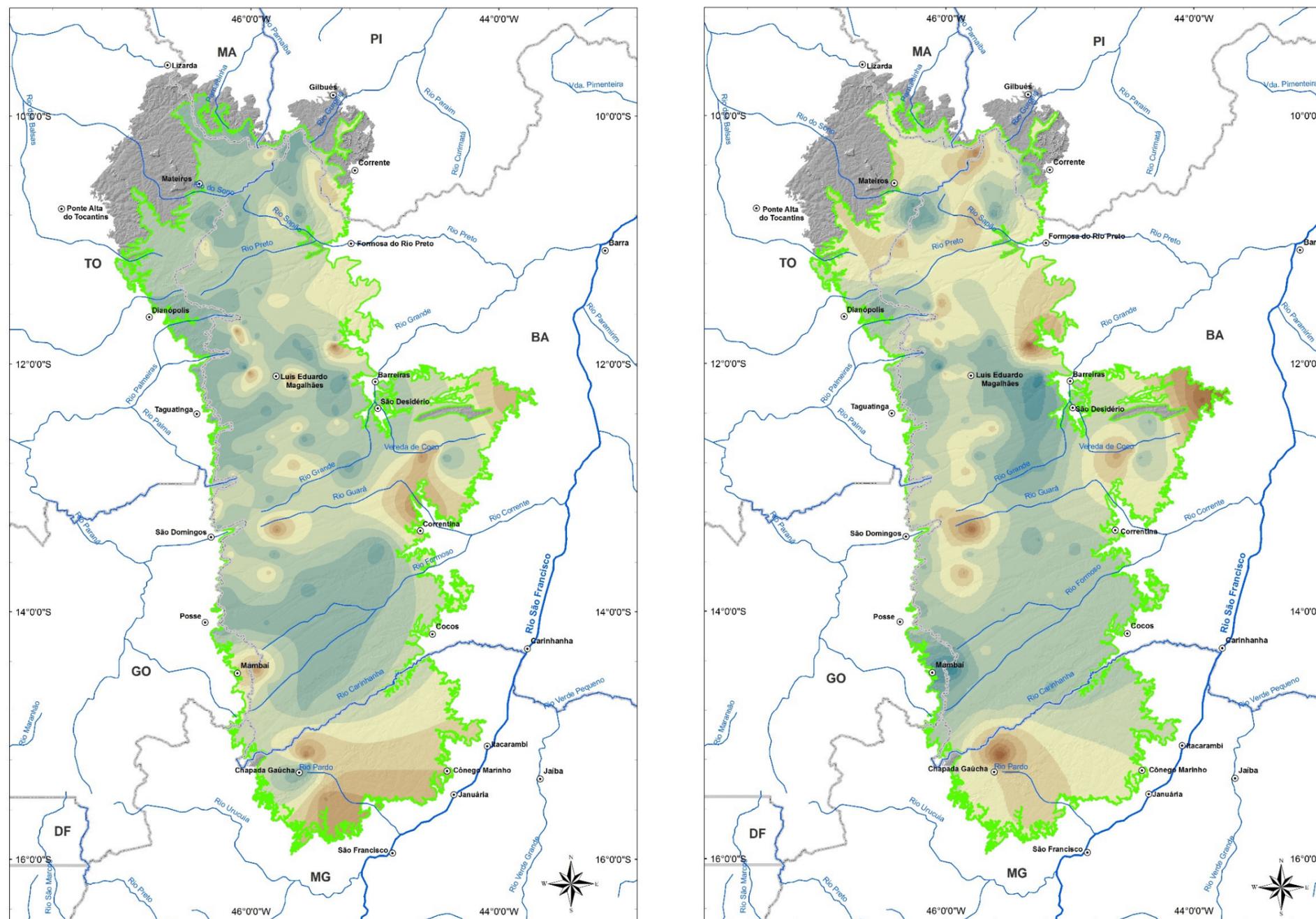


1ª Campanha

2ª Campanha



Figura 8.8 - Mapa de isovalores de condutividade elétrica do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.



1ª Campanha

2ª Campanha



Figura 8.9 - Mapa de isovalores de pH do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

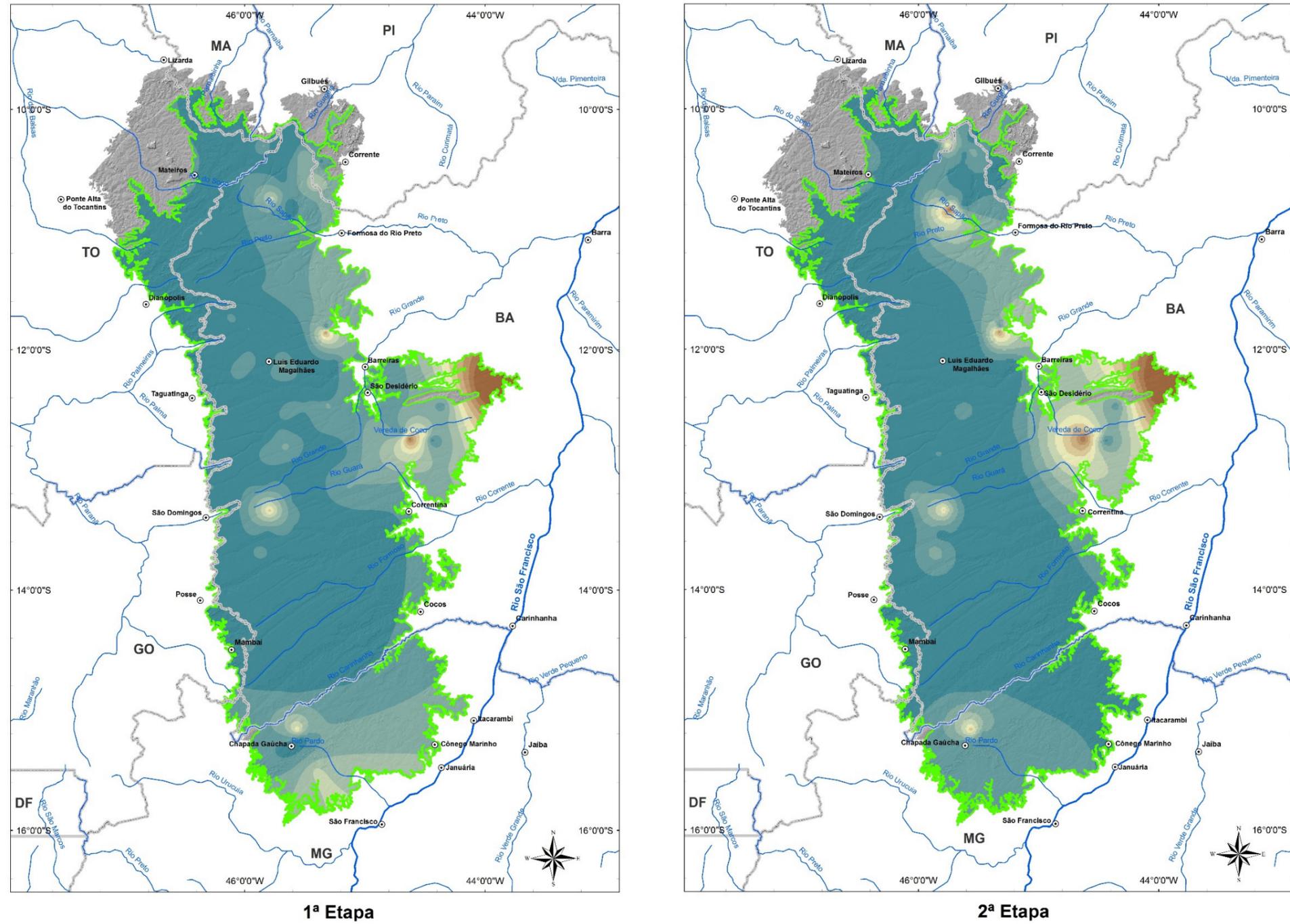


Figura 8.10 - Mapa de isovalores de alcalinidade (HCO_3) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

Os valores de sódio geralmente são baixos, menores que 1 mg/L (Figura 8.11). A distribuição dos valores de sódio mostra maior concentração deste elemento na porção leste, onde o SAU possui pequena espessura e assenta-se sobre o Grupo Bambuí. Um resultado anômalo (10,7 mg/L) foi observado na parte centro-norte da área (U39), na primeira campanha de amostragem, provavelmente relacionado com alguma contaminação; na segunda amostragem, esse valor caiu para 1,16 mg/L. Essa anomalia da primeira etapa é salientada no mapa de distribuição de Cloreto da Figura 8.13. Em geral, a distribuição de sódio permanece com a mesma tendência nas duas etapas de amostragens, não apresentando diferenças expressivas.

Os mapas de isovalores de cálcio mostram que os maiores valores estão concentrados nas bordas leste e sul da área (Figura 8.12), onde o SAU possui pequena espessura e assenta-se sobre o Grupo Bambuí. Os teores de cálcio nas águas amostradas são predominantemente menores que 1 mg/L. Na porção central da área aparece um teor anômalo elevado de cálcio (U107), combinado com teores também relativamente elevados de alcalinidade e pH. A distribuição para o cátion cálcio segue semelhante nas duas etapas de amostragens.

A Figura 8.13 apresenta a distribuição dos valores de cloreto. Geralmente as águas do SAU possuem concentrações menores do que 1 mg/L para este íon. Teores relativamente mais elevados de cloreto foram observados na borda leste, onde o substrato formado pelo Grupo Bambuí encontra-se próximo da superfície do terreno. No geral, a tendência de distribuição segue padrão semelhante nas duas etapas de coleta.

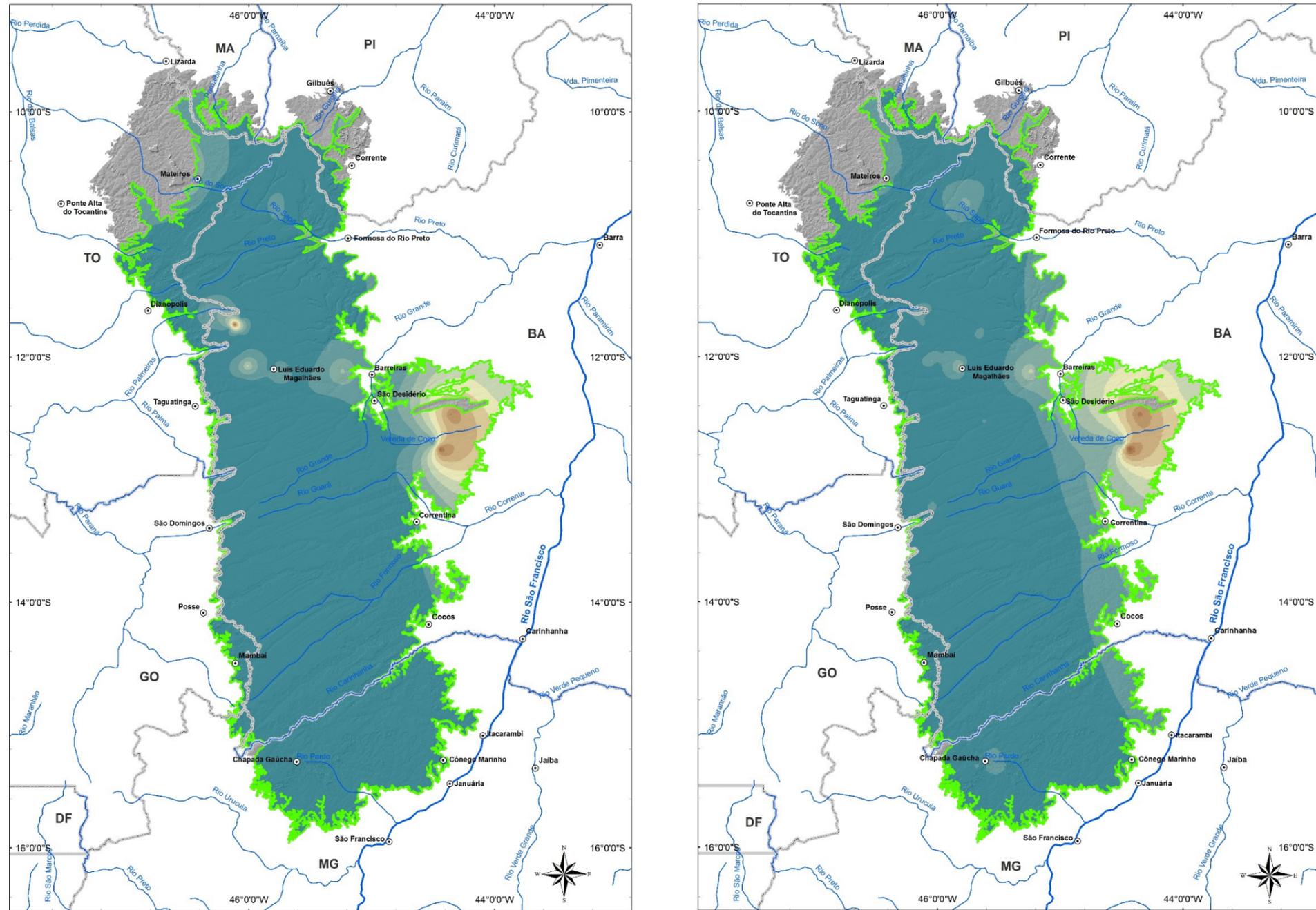
Os valores de nitrato estão abaixo de 0,5 mg/L nas amostras coletadas na área de pesquisa (Figura 8.14). Teores relativamente maiores ocorrem na borda noroeste da Sub-bacia Urucuaia. Alguns pontos isolados, com teores também mais elevados, ocorrem na parte central e leste da bacia, e podem estar relacionados à contaminação antrópica apenas no poço, haja vista serem em pontos específicos. A mesma distribuição permanece nas duas etapas de amostragem.

Os mapas de distribuição de isovalores de N-NH₃ segue a mesma tendência dos mapas de distribuição de nitrato, apresentando valores baixos, menores que 0,25 mg/L para as águas do SAU, com a presença de alguns pontos anômalos, principalmente na parte nordeste da área (Figura 8.15).

As concentrações de sulfato são predominantemente menores do que 0,1 mg/L, e os valores tendem a aumentar relativamente na porção leste. A amostra U39 apresenta teor alto deste íon em relação a outros pontos da borda oeste e área central do SAU, possivelmente relacionada à contaminação antrópica (Figura 8.16). Na segunda etapa, observa-se que na borda sudoeste da área aparecem dois pontos anômalos (U144 e U186), sendo provavelmente relacionado à contaminação antrópica.

Os mapas de distribuição de isovalores de ITB (Índice de Troca de Bases) são apresentados na Figura 8.17. A distribuição do ITB mostra predomínio de valores entre +0,5 e -0,5 em quase toda a área, devido à maior concentração do íon HCO₃ nas amostras, ocorrência comum nas águas subterrâneas.

Os valores de SAR (Razão de Absorção de Sódio) são predominantemente menores que 10, ou seja, indicam águas com baixa concentração de sódio e boa qualidade para irrigação (Figura 8.18). A distribuição de valores de SAR mostra tendência de crescimento na direção da borda leste da área, onde o SAU possui as menores espessuras e o substrato é representado pelo Aquífero Bambuí. Observa-se que a distribuição dos valores de SAR, para as duas campanhas de amostragens não apresenta diferenças expressivas. Em algumas análises da porção central do SAU, U20 e U39 (1ª. etapa) e U12 e U105 (2ª. etapa), valores elevados de SAR se devem a baixas concentrações de cálcio e magnésio.

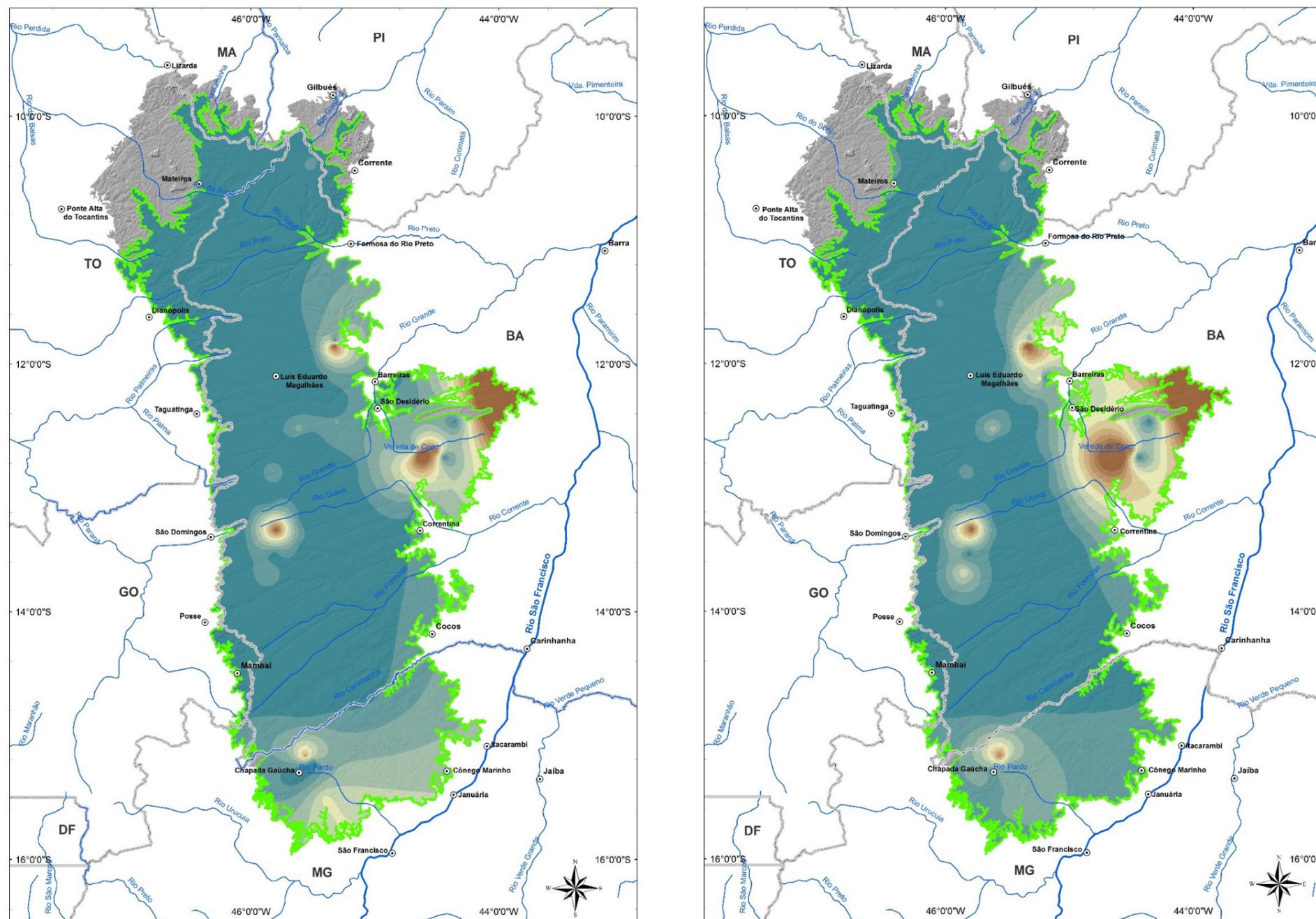


1ª Campanha

2ª Campanha



Figura 8.11 - Mapa de isovalores de sódio (Na) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

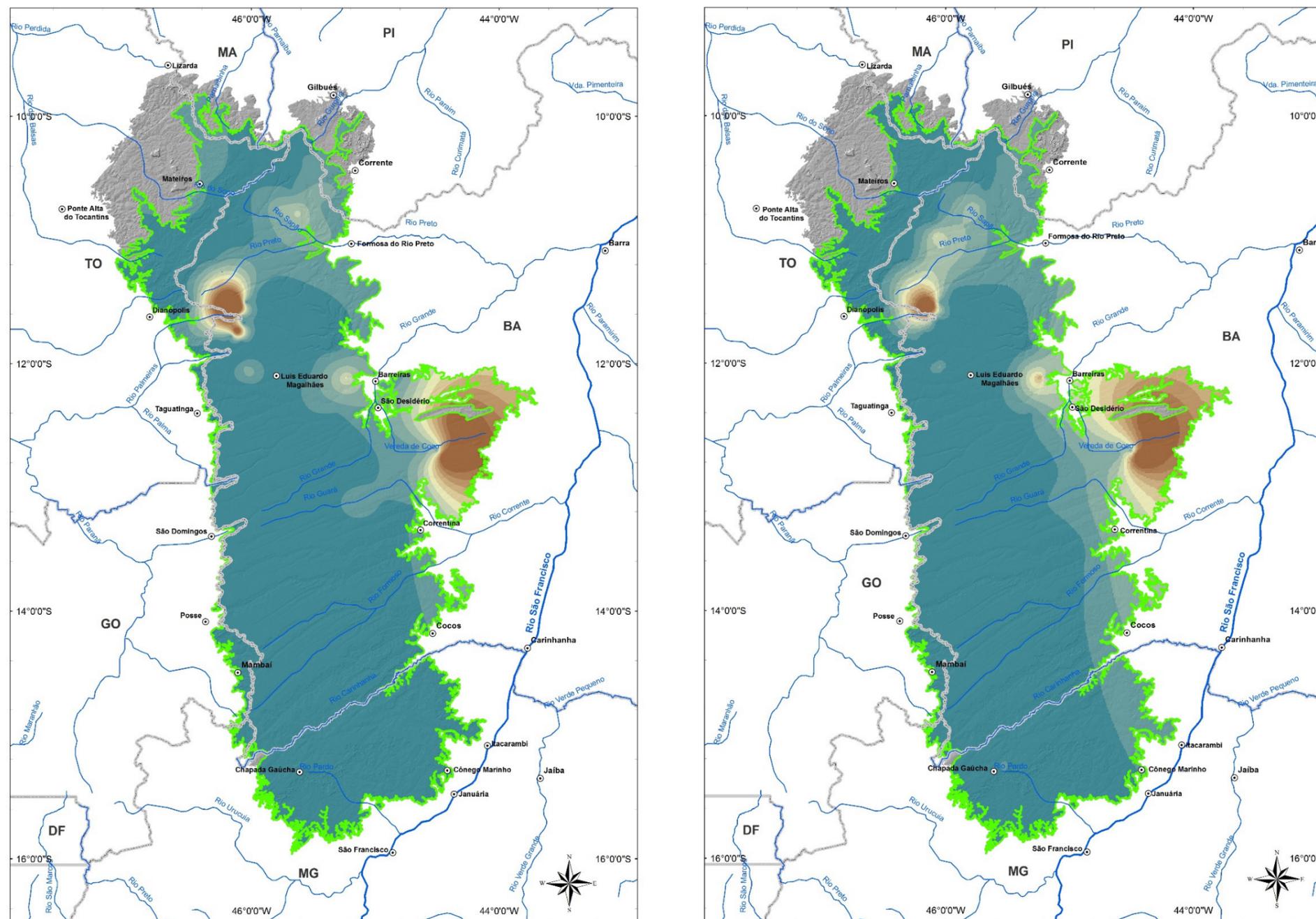


1ª Campanha

2ª Campanha



Figura 8.12 - Mapa de isovalores de cálcio (Ca) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

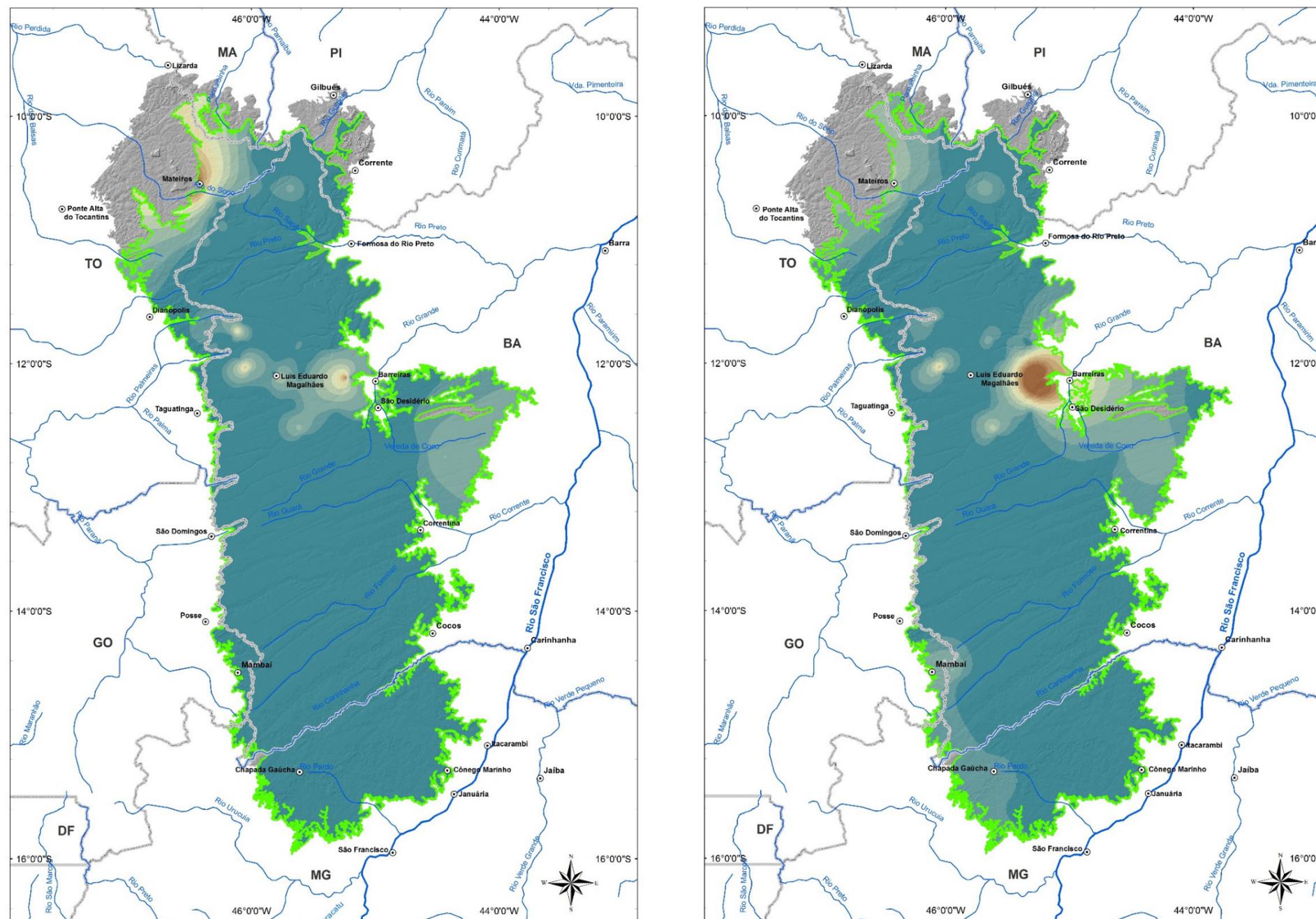


1ª Campanha

2ª Campanha



Figura 8.13 - Mapa de isovalores de cloreto (Cl) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

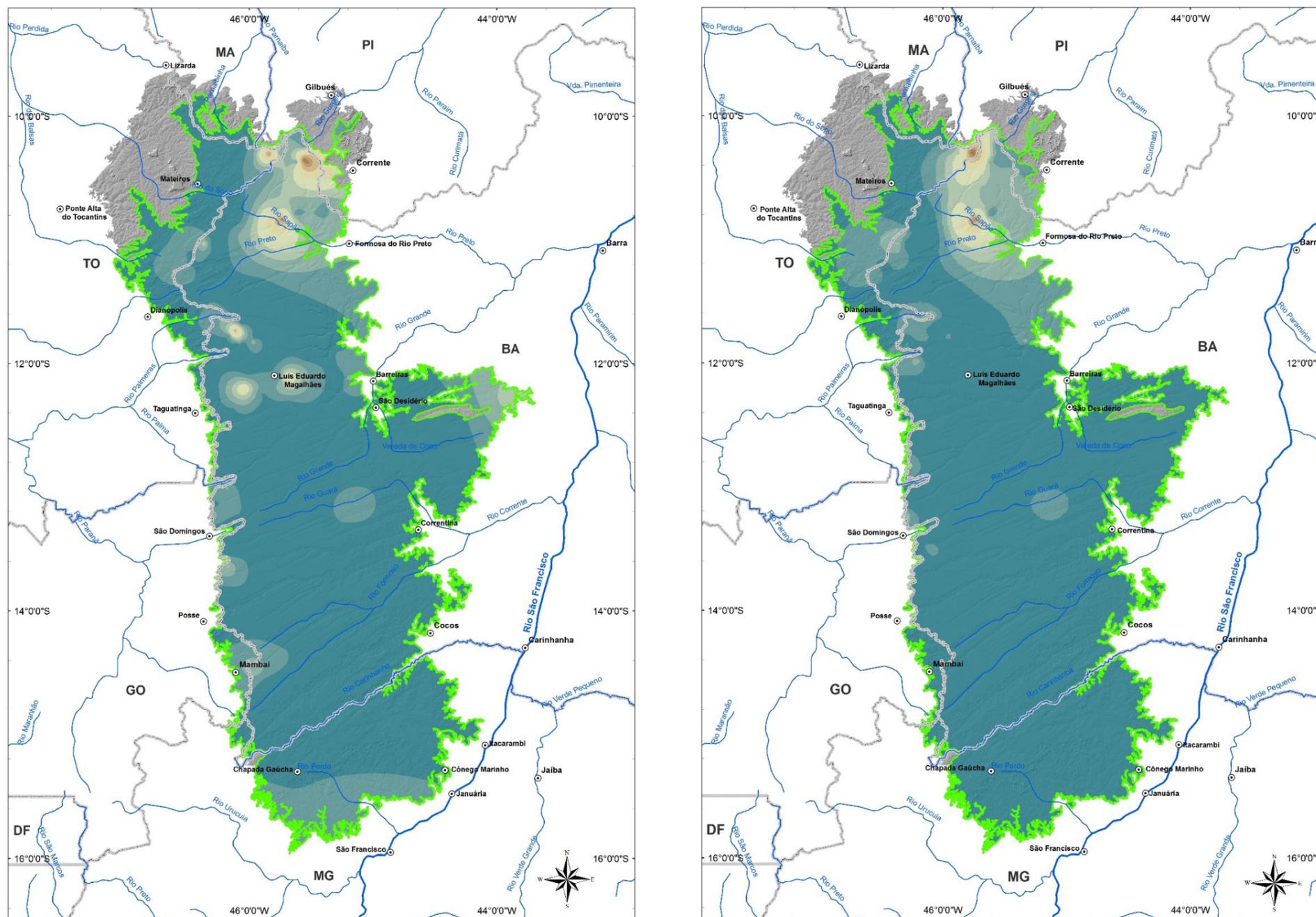


1ª Etapa

2ª Etapa



Figura 8.14 - Mapa de isovalores de nitrato (NO₃) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

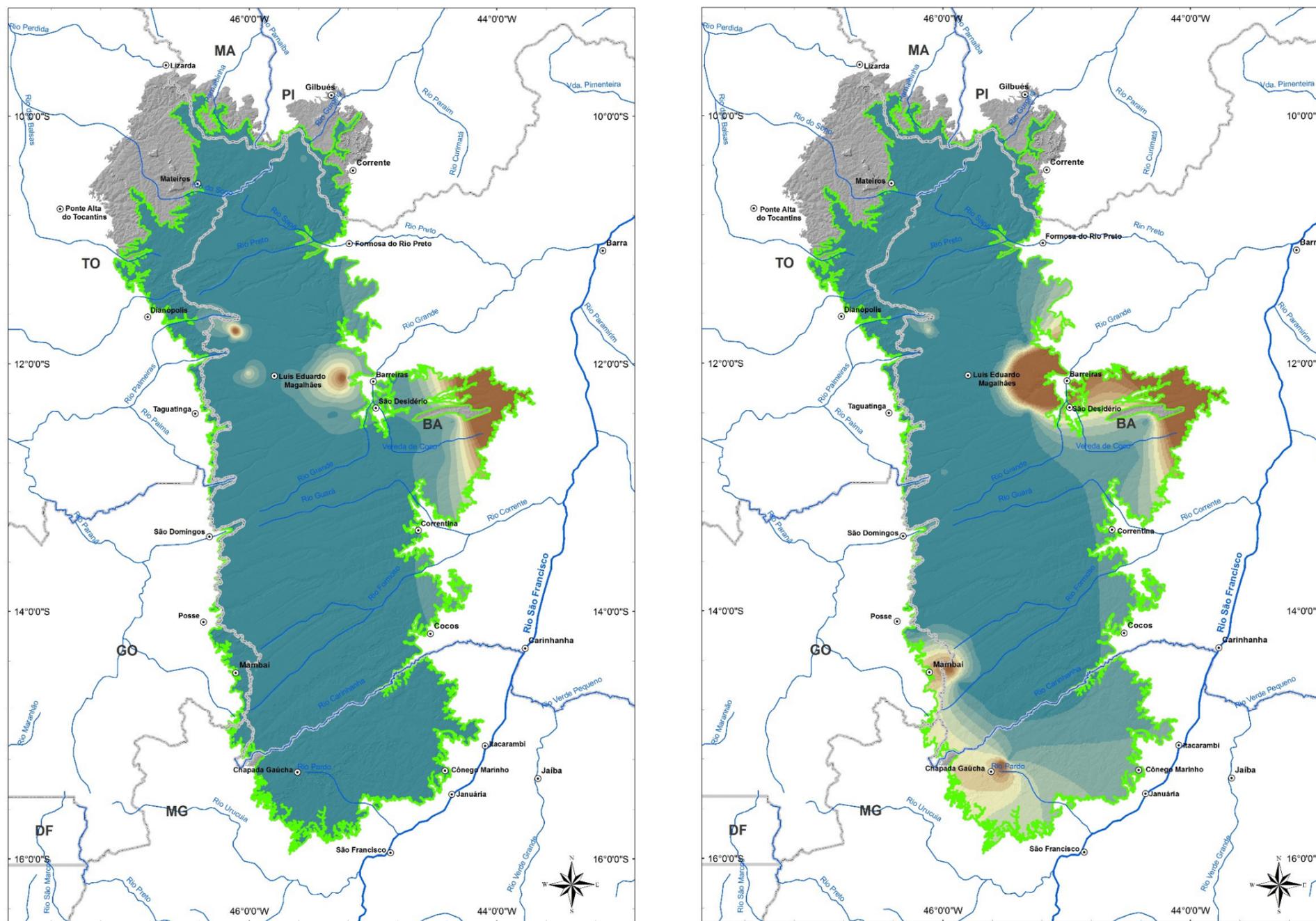


1ª Etapa

2ª Etapa



Figura 8.15 - Mapa de isovalores de N-NH₃ do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

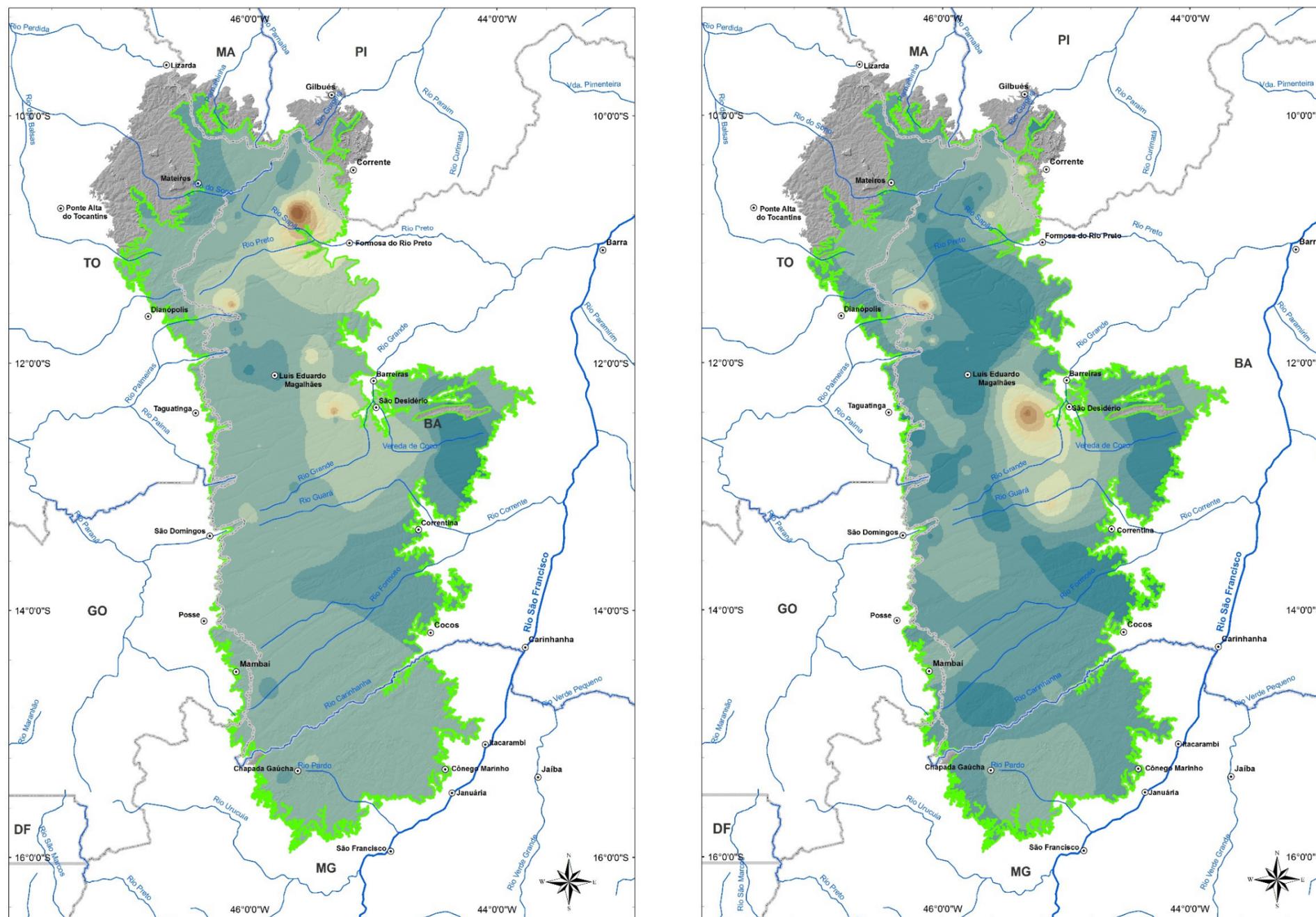


1ª Etapa

2ª Etapa

<p>Mapa de localização da área de estudo</p>	<p>Convenções Cartográficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sede Municipal — Hidrografia □ Limite Estadual — Massas d'água 	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rio São Francisco — SAU (MDT) — Limites operacionais do SAU 	<p>Sulfato - SO₄ (mg/L)</p> <table border="1"> <tr> <td>-0,013 - 0,1</td> <td>0,61 - 0,7</td> </tr> <tr> <td>0,11 - 0,2</td> <td>0,71 - 0,8</td> </tr> <tr> <td>0,21 - 0,3</td> <td>0,81 - 0,9</td> </tr> <tr> <td>0,31 - 0,4</td> <td>0,91 - 1</td> </tr> <tr> <td>0,41 - 0,5</td> <td>> 1</td> </tr> <tr> <td>0,51 - 0,6</td> <td></td> </tr> </table>	-0,013 - 0,1	0,61 - 0,7	0,11 - 0,2	0,71 - 0,8	0,21 - 0,3	0,81 - 0,9	0,31 - 0,4	0,91 - 1	0,41 - 0,5	> 1	0,51 - 0,6		<p>PROJEÇÃO GEOGRÁFICA</p> <p>Datum Horizontal: SAD/69</p> <p>Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr</p> <p>Acrecidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente</p> <p> </p> <p>Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada</p> <p>TÍTULO</p> <p>Mapa de isovalores de sulfato (SO₄) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2</p> <p>ESCALA NUMÉRICA</p> <p>1:3.000.000</p> <p>ESCALA GRÁFICA</p> <p>0 10 20 40 60 80 km</p>
	-0,013 - 0,1	0,61 - 0,7														
0,11 - 0,2	0,71 - 0,8															
0,21 - 0,3	0,81 - 0,9															
0,31 - 0,4	0,91 - 1															
0,41 - 0,5	> 1															
0,51 - 0,6																

Figura 8.16 - Mapa de isovalores de sulfato (SO₄) do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

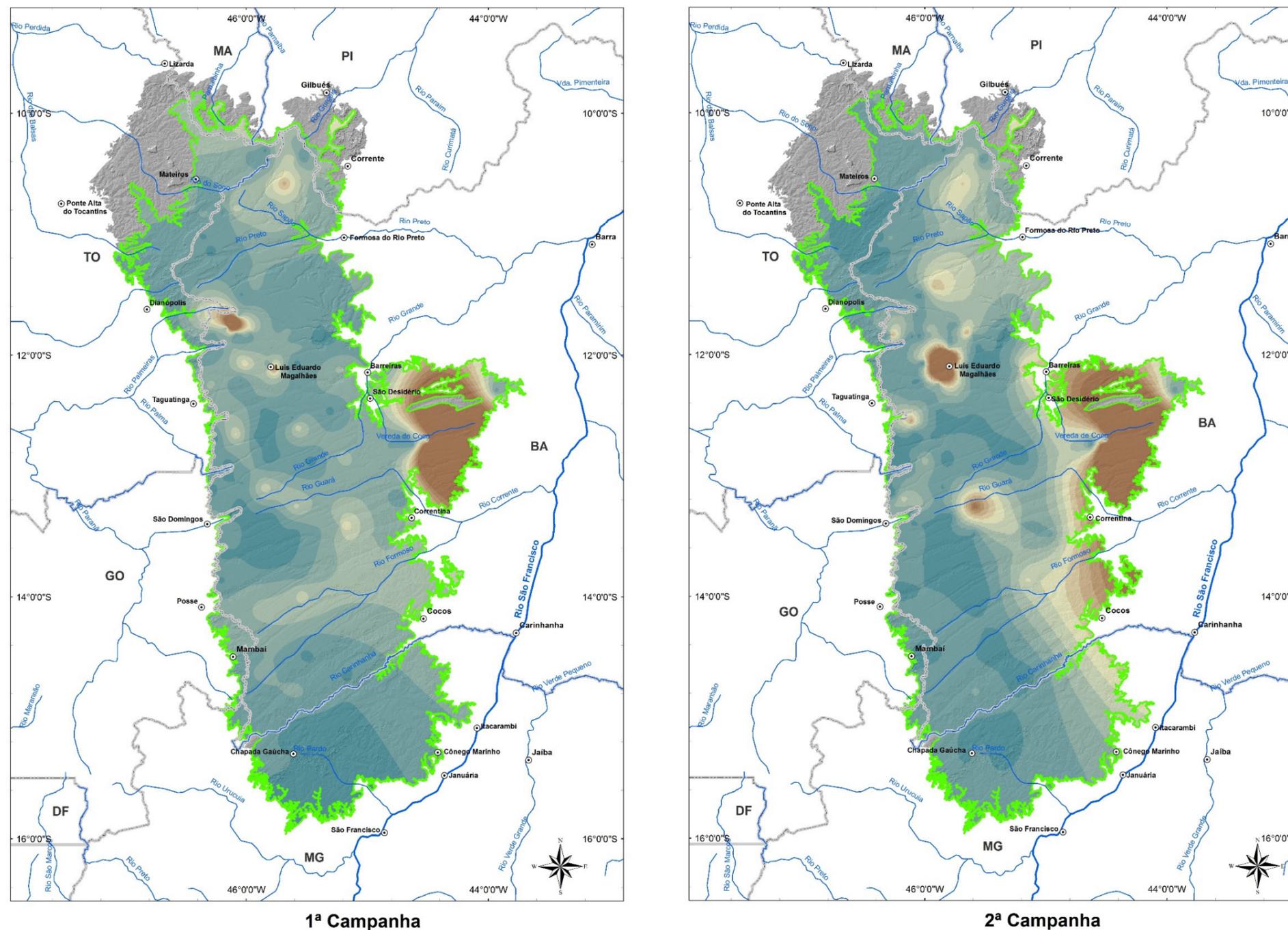


1ª Campanha

2ª Campanha

<p>Mapa de localização da área de estudo</p>	<p>Convenções Cartográficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sede Municipal — Hidrografia □ Limite Estadual — Massas d'água 	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rio São Francisco — SAU (MDT) — Limites operacionais do SAU 	<p>Índice de Troca de Bases - ITB</p> <table border="1"> <tr> <td>< -0,5</td> <td>0,51 - 0,75</td> </tr> <tr> <td>-0,49 - -0,25</td> <td>0,76 - 1</td> </tr> <tr> <td>-0,24 - 0</td> <td>1,1 - 1,3</td> </tr> <tr> <td>0,01 - 0,25</td> <td>1,4 - 1,5</td> </tr> <tr> <td>0,26 - 0,5</td> <td>> 1,5</td> </tr> </table>	< -0,5	0,51 - 0,75	-0,49 - -0,25	0,76 - 1	-0,24 - 0	1,1 - 1,3	0,01 - 0,25	1,4 - 1,5	0,26 - 0,5	> 1,5	<p>PROJEÇÃO GEOGRÁFICA</p> <p>Datum Horizontal: SAD'89 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente</p> <p> </p> <p>Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada</p> <p>TÍTULO Mapa de isovalores do Índice de Troca de Bases - ITB do SAU (Grupo 1) - Campanhas 1 e 2</p> <p>ESCALA NUMÉRICA 1:3.000.000</p> <p>ESCALA GRÁFICA 0 10 20 40 60 80 km</p>
	< -0,5	0,51 - 0,75												
-0,49 - -0,25	0,76 - 1													
-0,24 - 0	1,1 - 1,3													
0,01 - 0,25	1,4 - 1,5													
0,26 - 0,5	> 1,5													

Figura 8.17 - Mapa de isovalores do Índice de Troca de Bases - ITB do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.



<p>Mapa de localização da área de estudo</p>	<p>Convenções Cartográficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sede Municipal — Hidrografia □ Limite Estadual Massas d'água 	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rio São Francisco SAU (MDT) Limites operacionais do SAU 	<p>Razão de Absorção de Sódio - SAR</p> <table border="1"> <tr> <td>< 1</td> <td>6,1 - 7</td> </tr> <tr> <td>1,1 - 2</td> <td>7,1 - 8</td> </tr> <tr> <td>2,1 - 3</td> <td>8,1 - 9</td> </tr> <tr> <td>3,1 - 4</td> <td>9,1 - 10</td> </tr> <tr> <td>4,1 - 5</td> <td>> 10</td> </tr> <tr> <td>5,1 - 6</td> <td></td> </tr> </table>	< 1	6,1 - 7	1,1 - 2	7,1 - 8	2,1 - 3	8,1 - 9	3,1 - 4	9,1 - 10	4,1 - 5	> 10	5,1 - 6		<p>PROJEÇÃO GEOGRÁFICA</p> <p>Datum Horizontal: SAD/69</p> <p>Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr</p> <p>Acréscidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente</p> <p> </p> <p>Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada</p> <p>TÍTULO</p> <p>Mapa de isovalores de Razão de Absorção de Sódio - SAR do SAU (Grupo 1) - Campanhas 1 e 2</p> <p>ESCALA NUMÉRICA</p> <table border="1"> <tr> <td>1:3.000.000</td> <td>NÚMERO FIGURA</td> </tr> <tr> <td></td> <td>8.18</td> </tr> </table> <p>ESCALA GRÁFICA</p>	1:3.000.000	NÚMERO FIGURA		8.18
	< 1	6,1 - 7																		
1,1 - 2	7,1 - 8																			
2,1 - 3	8,1 - 9																			
3,1 - 4	9,1 - 10																			
4,1 - 5	> 10																			
5,1 - 6																				
1:3.000.000	NÚMERO FIGURA																			
	8.18																			

Figura 8.18 - Mapa de isovalores de Razão de Absorção de Sódio - SAR do SAU (Grupo 1) - Etapas 1 e 2.

8.1.6 Qualidade da Água

Conforme anteriormente citado, na segunda campanha de amostragens de água na região de estudo, foram selecionados pontos e coletadas amostras para análises de metais pesados, agroquímicos, índices de fenóis, BTEX e conteúdo bacteriológico.

Com relação aos metais pesados – bário, cádmio, cromo, cobre, níquel, chumbo, zinco, arsênio e mercúrio –, todas as amostras estão abaixo dos respectivos valores máximos permitidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

No que se refere aos agroquímicos, da mesma forma, todas as amostras analisadas apresentam concentrações desses compostos inferiores aos valores máximos permitidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Quanto aos fenóis, os valores variam de $< 0,001$ mg/L ($1 \mu\text{g/L}$) a $0,009$ mg/L ($9 \mu\text{g/L}$), todos abaixo do limite de quantificação praticável (LQP) definido pela resolução Conama 396/2008. No entanto, a maioria das amostras apresenta concentrações acima de $1 \mu\text{g/L}$, necessitando de tratamento convencional prévio para consumo humano, segundo a resolução Conama 357/2005, que estabelece que valores de fenóis acima de $1 \mu\text{g/L}$ necessitam de tratamento; já o limite máximo de conteúdo em fenóis para tratamento, segundo a mesma resolução, é de $30 \mu\text{g/L}$.

A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, bem como a Resolução 396/2008 estabelecem valores máximos de $0,005$ mg/L de benzeno, $0,17$ mg/L de tolueno, $0,2$ mg/L de etilbenzeno, e $0,3$ de o-xileno, m,p-xileno e xileno em água para consumo humano. Todas as amostras analisadas estão com valores inferiores aos máximos permitidos nas citadas Portaria e Resolução. Cabe também ressaltar que todas as análises estão abaixo do limite da técnica empregada para detecção desses compostos orgânicos.

As mesmas normas estabelecem que, para consumo humano, o conteúdo bacteriológico deve ser ausente em 100 mL de amostra. Algumas amostras apresentam resultados positivos para essas análises, conforme ilustra a Figura 8.19, observando-se que esses pontos estão localizados na área de ocorrência do SAA.

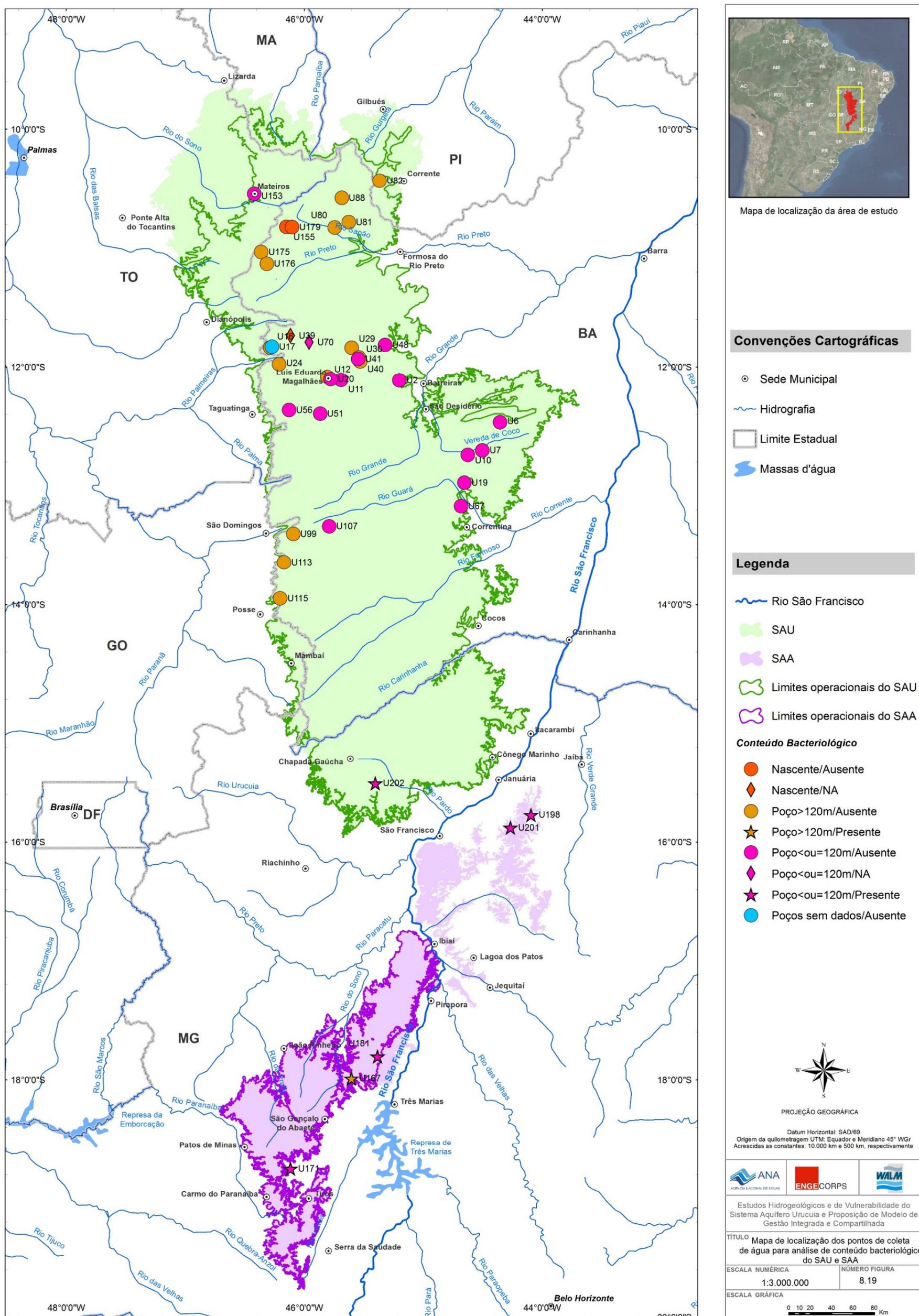


Figura 8.19 - Mapa de localização dos pontos de coleta de água para análise de conteúdo bacteriológico do SAU e SAA.

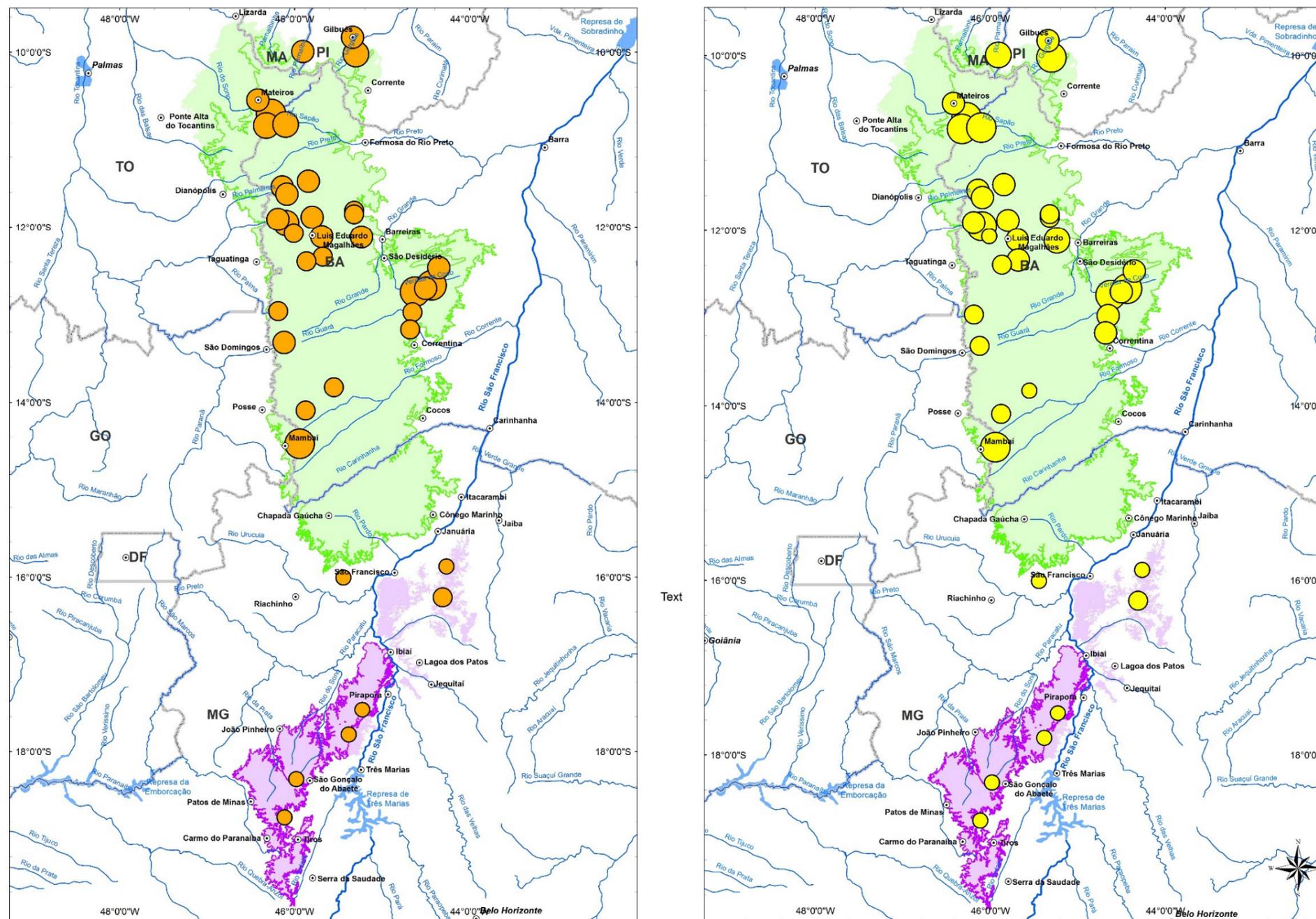
8.1.7 Isótopos estáveis de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e Deutério (δD)

Foram coletadas na segunda campanha 40 amostras de água selecionadas dos dois sistemas aquíferos estudados, para análise dos isótopos ^{18}O e Deutério. Em campo, foram seguidos todos os padrões recomendados para amostragem; em seguida, essas amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP para análises isotópicas.

O hidrogênio e o oxigênio da água ocorrem com diferentes combinações isotópicas em suas moléculas. Mais comum e de maior interesse para hidroquímica são as moléculas $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (comum), $^1\text{HD}^{16}\text{O}$ (raro) e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ (raro), que podem ser divididas entre moléculas leves ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) e moléculas pesadas ($^1\text{HD}_{16}\text{O}$ e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$).

Verificou-se que a maioria das amostras, tanto as coletadas nas nascentes quanto nos poços, tem composição isotópica próxima à da linha meteórica global (LMG), confirmando sua origem meteórica. Os valores predominantes estão entre -5‰ e -3‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -30‰ e -20‰ para δD .

Observou-se, também, que a região do SAU tem mais amostras enriquecidas que aquelas da área do SAA (Figura 8.20). Esse fato está provavelmente relacionado a fatores climáticos da época da recarga e/ou a misturas com águas dos outros aquíferos.



Isótopo - $\delta^{18}O$

Isótopo - δD

<p>Mapa de localização da área de estudo</p>	<p>Convenções Cartográficas</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Sede Municipal — Hidrografia □ Limite Estadual — Massas d'água 	<p>Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> — Rio São Francisco SAU SAA Limites operacionais do SAU Limites operacionais do SAA 	<p>Isótopo - $\delta^{18}O$ (‰)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ < -5,0 ○ -4,9 - -4,0 ○ -3,9 - -3,0 ○ -2,9 - -2,0 ○ > -2,0 	<p>Isótopo - δD (‰)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ < -30,0 ○ -29,9 - -25,0 ○ -24,9 - -20,0 ○ -19,9 - -15,0 ○ > -15 	<p>PROJEÇÃO GEOGRÁFICA</p> <p>Datum Horizontal: SAD89</p> <p>Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr</p> <p>Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente</p> <p> </p> <p>Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquifero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada</p> <p>TÍTULO</p> <p>Mapas de distribuição de $\delta^{18}O$ e δD do SAU e SAA - Etapa 2</p> <p>ESCALA NUMÉRICA: 1:4.250.000</p> <p>ESCALA GRÁFICA: 0 15 30 60 90 120 Km</p>
	<p>Mapa de localização da área de estudo</p>				

Figura 8.20 - Mapas de distribuição de $\delta^{18}O$ e δD do SAU e SAA - Etapa 2.

8.1.8 Isótopos Radioativos de Carbono 14 (^{14}C) e Trítio (^3H)

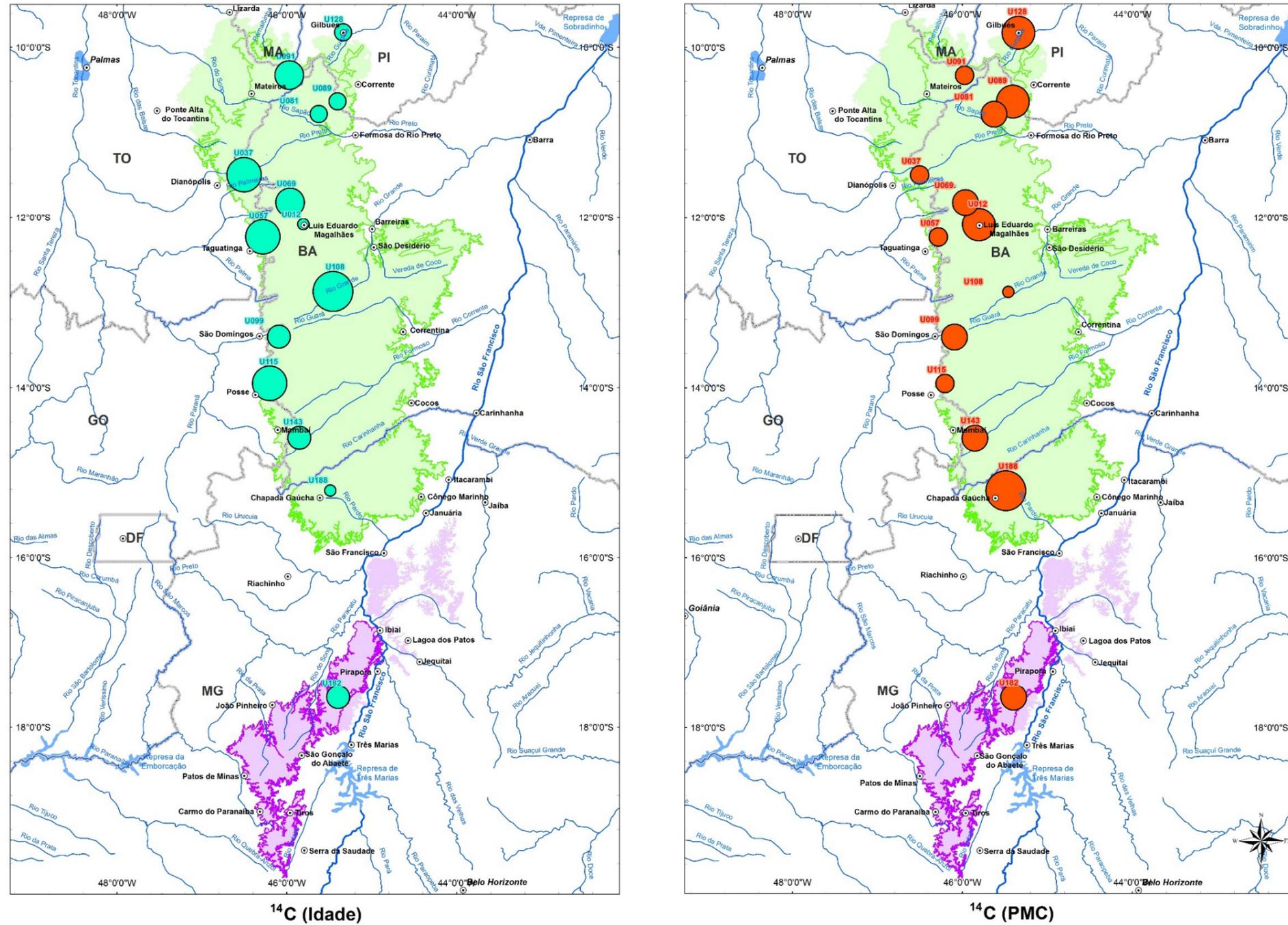
A radioatividade presente nos isótopos instáveis (radioisótopos), por estar estatisticamente relacionada com o tempo (mensurada em desintegrações por unidade de tempo), presta-se à determinação do tempo de permanência ou da idade do traçador no aquífero, ou seja, constitui um meio de datação da água subterrânea.

O ^{14}C e o T (^3H – Trítio) são amplamente utilizados na datação de águas devido ao apropriado tempo de meia-vida que possuem, respectivamente de 5.730 anos e 12,43 anos. Esses tempos definem faixas acessíveis de datação de 200 anos a 30.000 anos e de 0 anos a 50 anos, respectivamente. Ambos os isótopos são de origem secundária e produzidos na alta atmosfera em reações nucleares, resultantes do bombardeio de fluxo de nêutrons da radiação cósmica secundária com átomos de nitrogênio presentes na atmosfera.

Considerando o Carbono-14 (^{14}C), as idades encontradas variam de 450 anos a 2.840 anos, sendo que as mais antigas estão predominantemente localizadas na borda oeste da região de ocorrência do SAU (Figura 8.21).

Para análises de trítio (^3H), os valores de $\delta^3\text{H}$ variam de 0,8 TU (U7) a 1.8 TU (U144). Desse modo, pode-se interpretar que a recarga é submoderna, ou seja, anterior a 1952 em determinados pontos, enquanto em outros é uma mistura entre recarga submoderna e recarga recente.

Cabe ressaltar, entretanto, que a amostragem, possivelmente, reflete misturas de águas em um mesmo poço, ou seja, águas mais antigas da parte mais profunda do poço, com águas mais jovens da parte mais superficial do poço, interferindo assim nos resultados. Na Figura 8.22, observa-se que as águas classificadas como submodernas estão, em sua maioria, nas porções leste e norte da área do SAU, com exceção da amostra U147.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- ☁ Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU
- SAA
- Limites operacionais do SAU
- Limites operacionais do SAA

¹⁴C (Idade)

- < 500
- 501 - 1000
- 1000 - 15000
- 1500 - 2000
- 2001 - 2500
- > 2500

¹⁴C (PMC)

- < 0,70
- 0,71 - 0,80
- 0,81 - 0,90
- 0,91 - 1,00
- > 1,00

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD 89
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA ENGECORPS WLM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

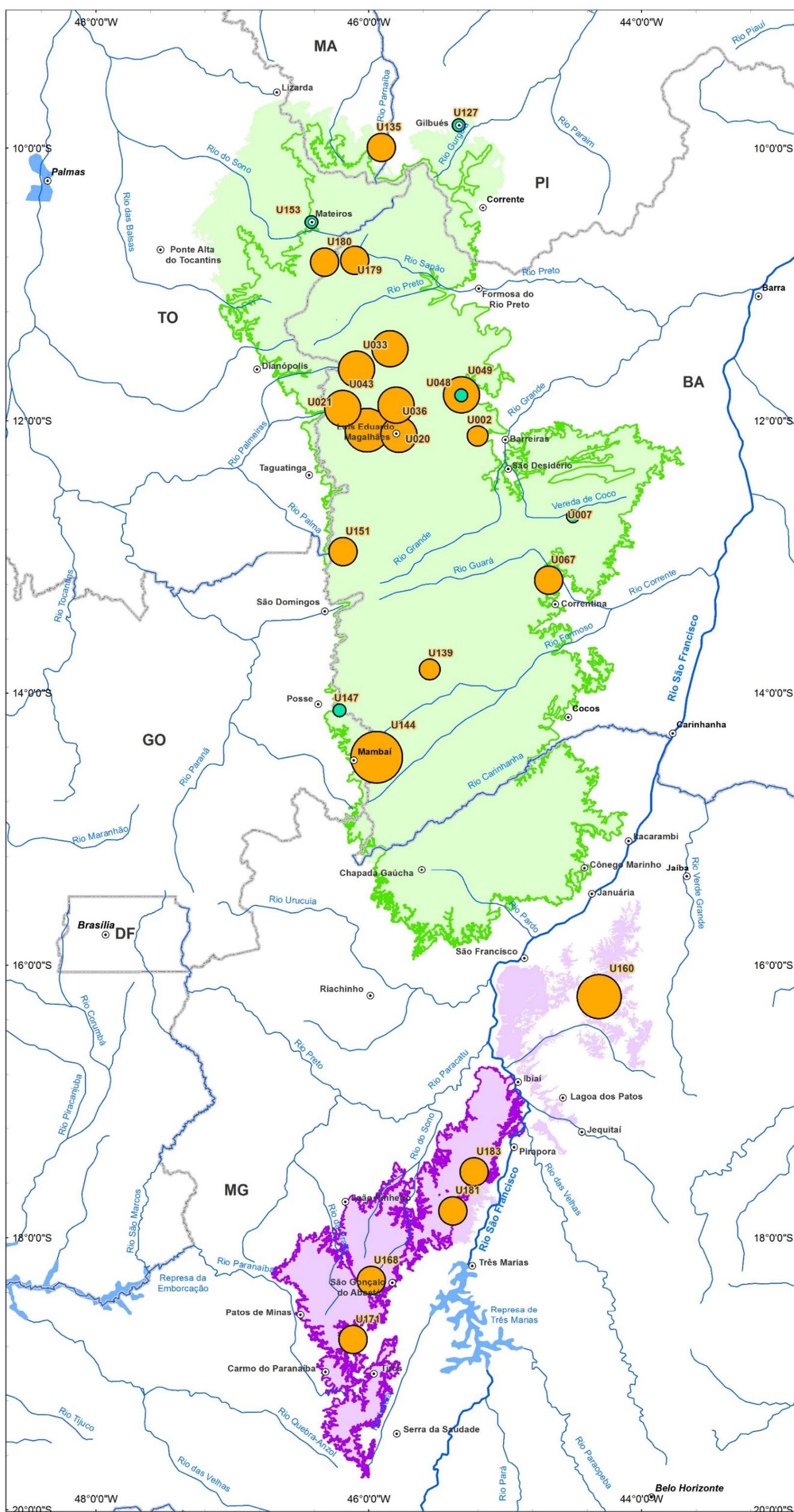
TÍTULO

Mapa de distribuição de ¹⁴C (Idade e PMC) no SAU e SAA - Etapa 2

ESCALA NUMÉRICA: 1:4.250.000 NÚMERO FIGURA: 8.21

ESCALA GRÁFICA: 0 15 30 60 90 120 Km

Figura 8.21 - Mapas de distribuição de ¹⁴C (Idade e PMC) no SAU e SAA - Etapa 2.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- Rio São Francisco
- SAU
- SAA
- Limites operacionais do SAU
- Limites operacionais do SAA

Tritio (³H)

- 0,70 - 0,80
- 0,81 - 1,00
- 1,01 - 1,20
- 1,21 - 1,40
- 1,41 - 1,60
- 1,61 - 1,80

Tritio (Classificação)

- Submoderno (Pré- 1952)
- Mistura de Submoderno + Recarga Recente
- Moderno (Pós 1980)
- ³H Residual de Bomba Termonuclear
- Recarga Principal nas Décadas de 60 e 70

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA
Datum Horizontal: SAD/69
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
Acréscidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA ENGE CORPS WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Mapa de distribuição de trítio (³H) no SAU e SAA - Etapa 2

ESCALA NUMÉRICA 1:3.000.000 NÚMERO FIGURA 8.22

ESCALA GRÁFICA 0 10 20 40 60 80 Km

Figura 8.22 - Mapa de distribuição de Trítio (³H) no SAU e SAA - Etapa 2.

8.1.9 Idade Radiométrica x Modelo Hidrogeológico

Diante dos resultados e interpretações das análises de radioisótopos antes apresentados, foi realizada uma análise comparativa com dados do modelo hidrogeológico concebido para o SAU para averiguação da afinidade entre ambos. Para tal finalidade foi utilizado o algoritmo MODPATH (“A Particle-Tracking Model for MODFLOW”) da USGS, com o modelo numérico produzido no Visual MODFLOW para simulação dos trajetos (*pathlines*) de partículas de água desde a recarga até o poço amostrado.

As simulações mostram o trajeto percorrido e o tempo necessário para que a partícula de água entre na zona de recarga e atinja o poço amostrado. Os pontos de amostragem são representados pelas células da segunda camada do modelo, haja vista que as profundidades amostradas nos poços são grandes (superiores a 180 metros) e em geral próximas à base do SAU modelado.

Os resultados das simulações indicam tempo de percurso que varia de 200 anos a 700 anos para distâncias percorridas entre 3 km e 17 km, conferindo velocidades médias notavelmente altas, de 12 m/ano a 40 m/ano. Para reproduzir idades semelhantes à datação radiométrica, que forneceram idades entre 400 anos e 2.900 anos, a distância média a ser percorrida, utilizando as mesmas velocidades médias obtidas pelo modelo numérico é de 36,5 km, compatível com as dimensões do SAU (~ 500 km x 150 km).

Devido à homogeneidade imposta ao modelo, o trajeto simulado tende a ser menor que o real, ou seja, as linhas de fluxo simuladas são mais curtas (Figura 8.23). Já para alcançar as idades determinadas por datação radiométrica ¹⁴C, é necessário utilizar valores de condutividade hidráulica inferiores a 10⁻⁷ m/s, incompatível com a geologia do SAU.

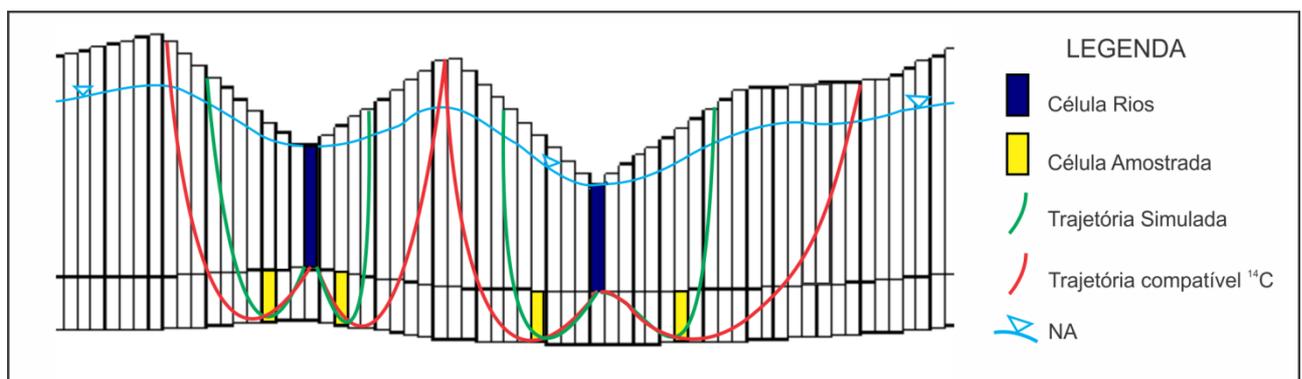


Figura 8.23 - Perfil esquemático comparando as linhas de fluxo seguindo a trajetória simulada e a trajetória que se ajusta às idades obtidas pelas datações de radiocarbono. As células Rios representam as drenagens, e as Amostradas representam as células interceptadas pelos poços em profundidade

Assim, considerou-se que as heterogeneidades locais do SAU (não contempladas no modelo) que influem no trajeto da água, de modo que variações nos parâmetros hidráulicos, como camadas mais ou menos cimentadas e lentes com maior argilosidade, defletem o trajeto de fluxo tornando-o mais longo.

Mesmo que a distância média de 36,5 km, necessária para reproduzir as idades radiométricas obtidas, esteja em consonância com as dimensões do SAU, deve-se considerar que outros fatores também podem influenciar nas idades determinadas, tais como erros associados às limitações do método de datação e da amostragem, presença de níveis com baixa condutividade hidráulica que retardam o fluxo que os permeiam e tempo de trânsito maior na zona não saturada, onde o fluxo é também controlado pelo grau de umidade do meio.

Tendo em vista esses diferentes condicionantes geológicos e metodológicos, as idades determinadas pelo método de radiocarbono são coerentes com as condições existentes no SAU, sendo, portanto, importante elemento a ser considerado na gestão das águas subterrâneas.

8.2 VULNERABILIDADE NATURAL DO SAU E DO SAA

O termo vulnerabilidade aplica-se ao estabelecimento das características intrínsecas que determinam a susceptibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante (Foster & Hirata 1993). A vulnerabilidade do aquífero é função da acessibilidade hidráulica de penetração de contaminantes e da capacidade de atenuação dos estratos situados acima da zona saturada. Paralta *et al.* (2005) admitem o conceito de vulnerabilidade específica, no caso em que se consideram também as propriedades de um poluente específico e suas relações com o meio físico.

Do ponto de vista da vulnerabilidade, os aquíferos superficiais ou freáticos são os mais susceptíveis à infiltração de contaminantes. As relações entre os aquíferos livres e os corpos de água superficiais, e com as formas de uso e ocupação do meio físico, são reguladas pela zona não saturada, a qual proporciona a proteção bio-físico-química das águas armazenadas no subsolo. Quanto mais espessa é a zona não saturada, maior será o tempo de trânsito das infiltrações que ocorrem a partir da superfície do terreno e, conseqüentemente, maior será a proteção bio-físico-química das águas.

Quanto mais próxima da superfície estiver a zona saturada, mais vulneráveis se tornam as águas subterrâneas aos agentes contaminantes que atingem o solo. Todavia, o grau de atenuação pode variar amplamente de acordo com o tipo e o processo de contaminação (Freeze & Cherry 1979).

A necessidade de propor um instrumento de avaliação para tomada de decisões em nível de planejamento tornou os mapas de vulnerabilidade peça interessante para os órgãos gestores. Vários são os métodos utilizados atualmente para caracterização da vulnerabilidade de um aquífero. Paralta *et al.* (2005) citam os métodos DRASTIC, índice de Susceptibilidade (IS), Índice AVI, GOD e EPPNA como os mais utilizados.

Em razão da facilidade de aplicação e disponibilidade de dados, foram utilizados neste estudo os métodos GOD e AVI para a caracterização da vulnerabilidade do SAU e apenas o método GOD para o Sistema Aquífero Areado.

O método GOD utiliza parâmetros relacionados à natureza do aquífero (condição do aquífero), tipo de substrato litológico e profundidade do nível de água. Para cada parâmetro é atribuído um valor específico, conforme classificação apresentada na Figura 8.24, e o produto destes valores fornece um índice geral de vulnerabilidade que vai desde insignificante até extremo. Estes parâmetros foram avaliados de acordo com as considerações abaixo:

- ✓ Condição do aquífero: conforme já exposto, o SAU e o SAA são caracterizados como tipo livre, com condutividades hidráulicas horizontal e vertical elevadas, não coberto. Para esta condição, considerou-se valor de 0,9.
- ✓ Substrato litológico: os sistemas aquíferos se caracterizam pela homogeneidade litológica, com termos predominantemente arenosos de granulometria variando de fina a grossa. Para esta condição, considerou-se valor de 0,75.
- ✓ Profundidade do nível de água: a profundidade do nível de água dos aquíferos é variável, conforme mostrado nos mapas potenciométricos antes apresentados. Para converter valores de carga hidráulica do mapa potenciométrico em valores de profundidade de nível de água, utilizou-se o método de subtração de *grids*. Dos valores de altitude do modelo digital de terreno (MDT) foram subtraídos os valores de carga hidráulica do mapa potenciométrico, resultando em mapa de profundidade de nível de água. Este mapa passou por filtros e ajustes para melhor representar este parâmetro. Em seguida, as profundidades do nível de água foram classificadas segundo os valores propostos na Figura 8.24.

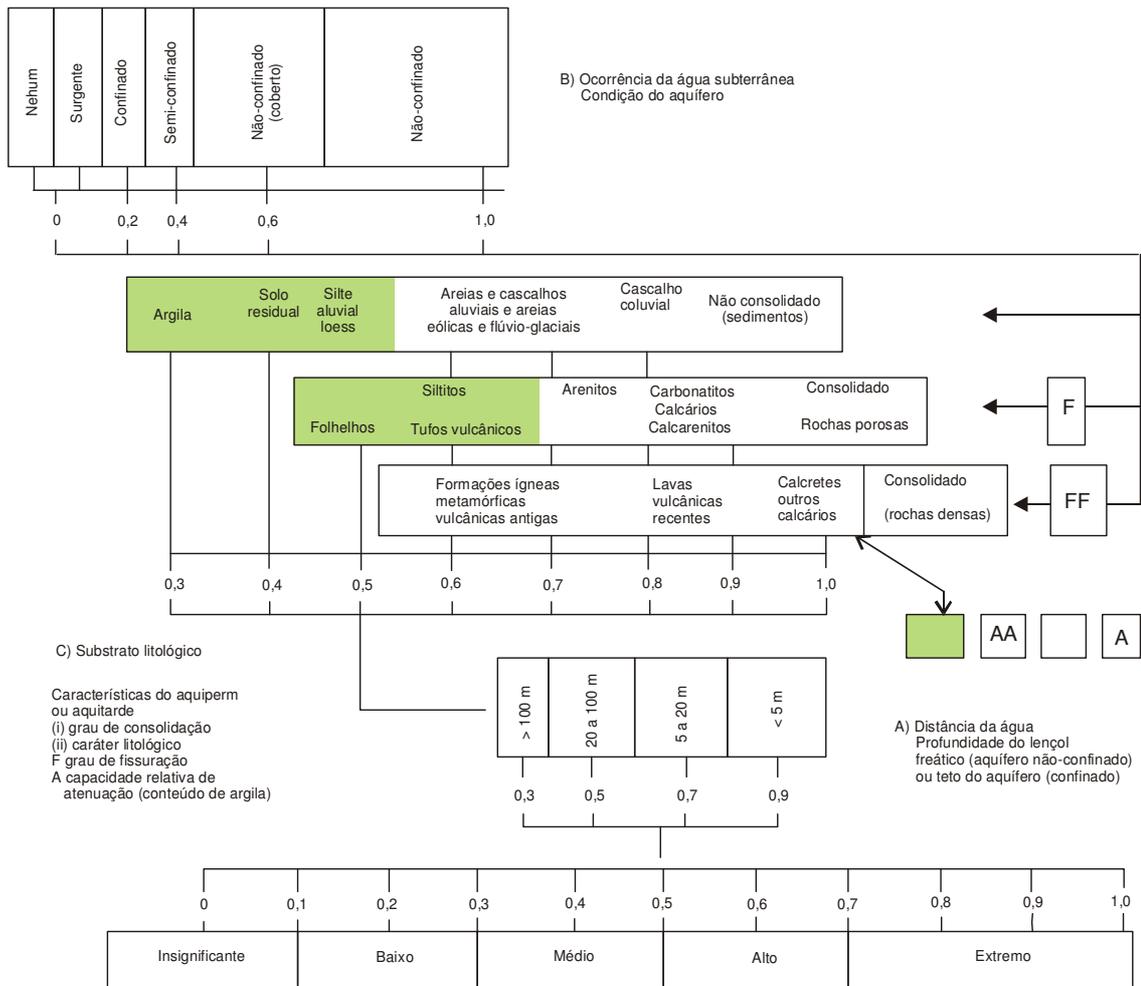


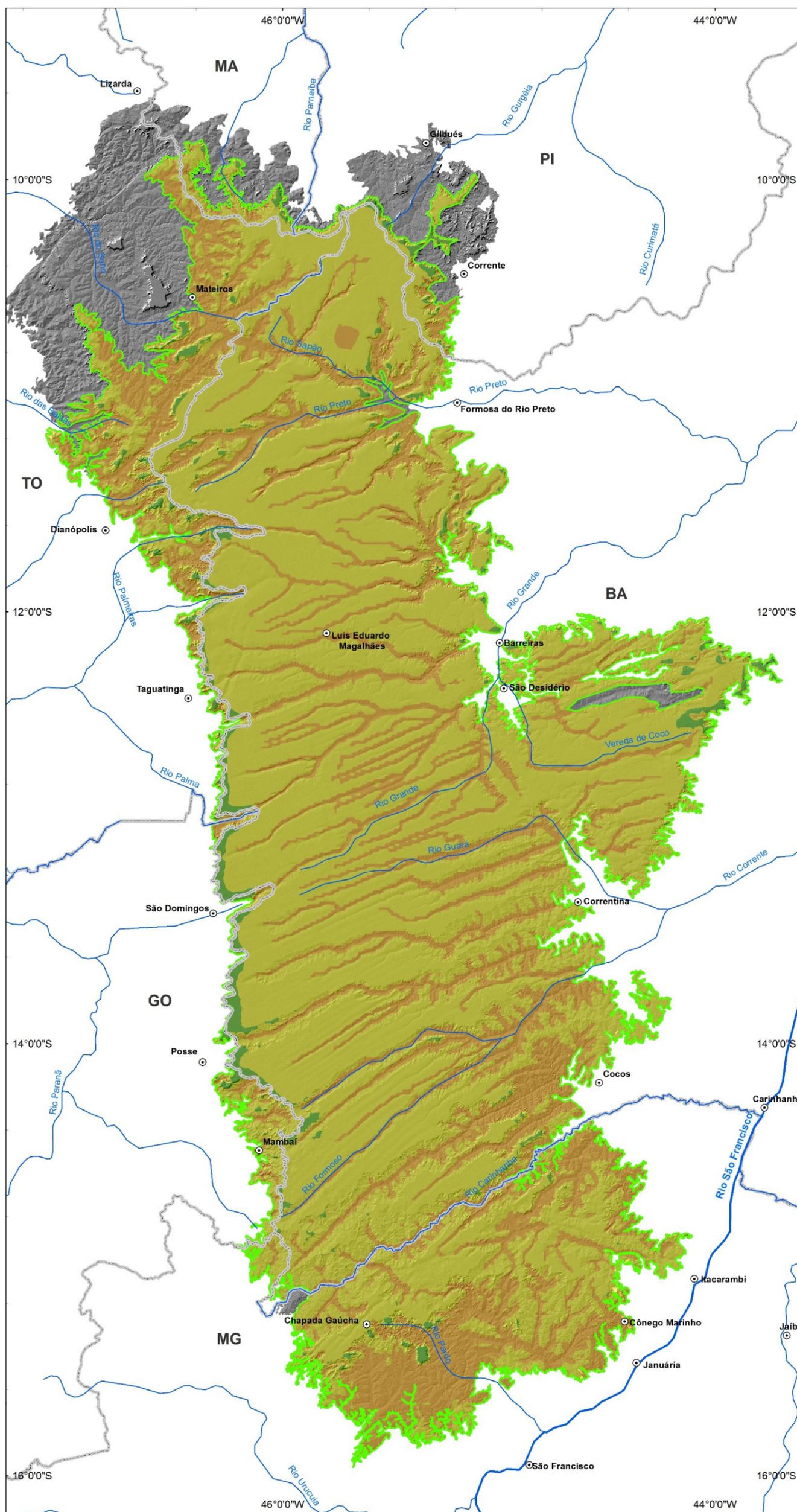
Figura 8.24 - Índices de vulnerabilidade de aquíferos (Foster & Hirata, 1993).

Considerando as variáveis do GOD, as duas primeiras condições são constantes, de modo que:

$$I_v = 0,9 \times 0,75 \times N_a = 0,625 \times N_a$$

Onde: I_v = índice de vulnerabilidade GOD; N_a = variável referente à classe de profundidade do nível de água. Ou seja, a variável independente que vai controlar o índice de vulnerabilidade GOD é a profundidade do nível de água, uma vez que os demais parâmetros são fixos.

O resultado da aplicação do método GOD é apresentado nos mapas da Figura 8.25 (SAU), e Figura 8.26 (SAA). Para o SAU, observa-se o predomínio de regiões classificadas como de vulnerabilidade média (82%), seguida de regiões de vulnerabilidade alta (16%) e baixa (2%). O método GOD não definiu regiões de vulnerabilidade extrema ou insignificante para o SAU e o SAA, com base nos índices estabelecidos.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- ☁ Massas d'água

Legenda

- ~ Rio São Francisco
 - ☁ SAU (MDT)
 - ☁ Limites operacionais do SAU
- Vulnerabilidade GOD**
Classificação
- 0,1 a 0,3 - Baixo
 - 0,3 a 0,5 - Médio
 - 0,5 a 0,7 - Alto



PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
Acréscidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente



Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
Mapa de vulnerabilidade do SAU segundo método GOD

ESCALA NUMÉRICA 1:1.900.000 NÚMERO FIGURA 8.25

ESCALA GRÁFICA
0 5 10 20 30 40 Km

Figura 8.25 - Mapa de vulnerabilidade do SAU segundo método GOD.

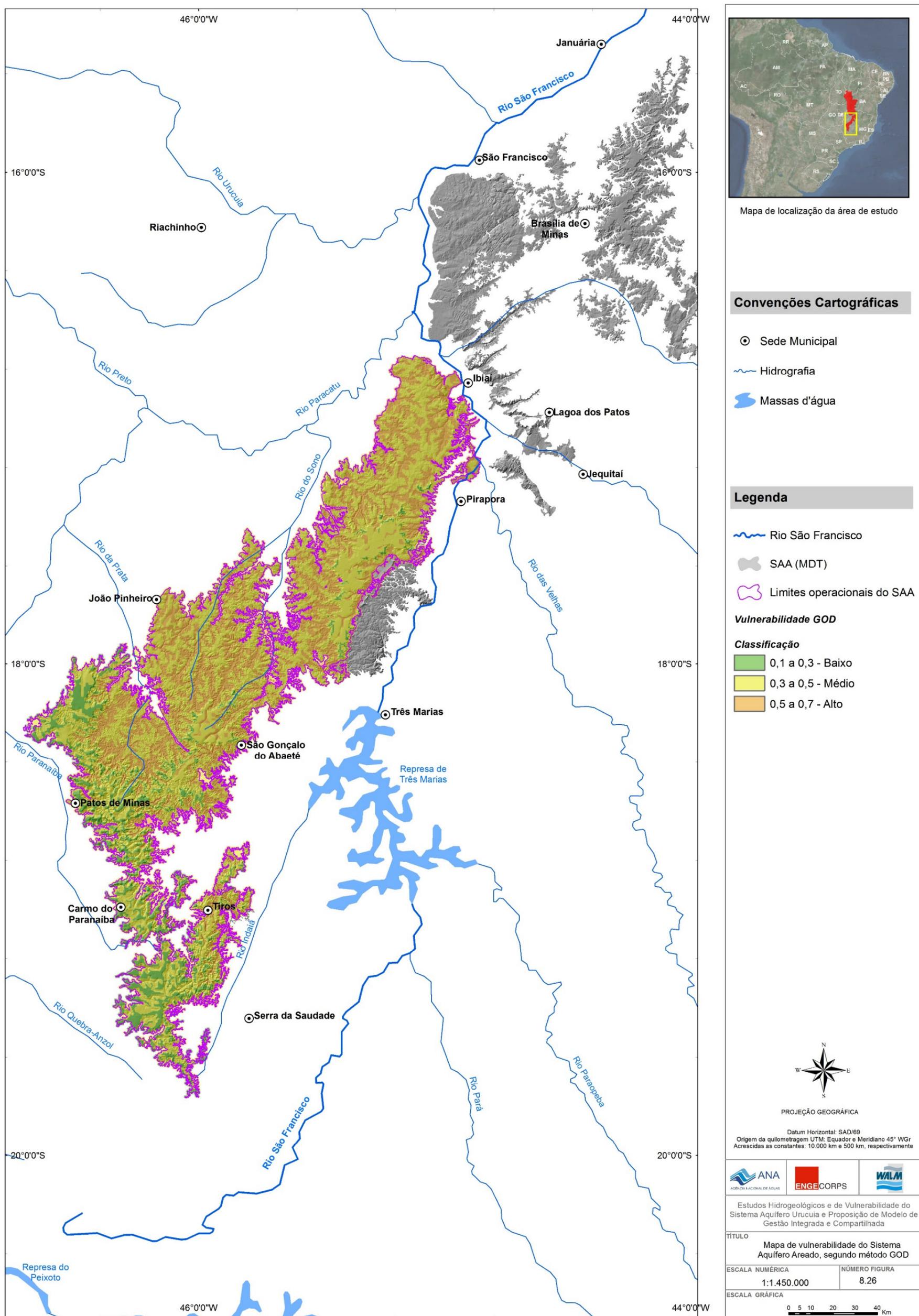


Figura 8.26 - Mapa de vulnerabilidade do SAA segundo método GOD.

O índice de vulnerabilidade do aquífero (AVI - Aquifer Vulnerability Index) foi proposto por Van Stempvoort *et al.* (1993, *apud* Paralta *et al.*, 2005). Este índice se baseia em apenas dois parâmetros:

- ✓ Espessura da camada não saturada em metros (E);
- ✓ Condutividade hidráulica das camadas em m/ano (K).

A equação que determina o índice AVI é definida como:

$$c = \sum_i E_i / K_i, \text{ para as camadas de } 1 \text{ a } i.$$

Onde: c= resistividade hidráulica medida em anos.

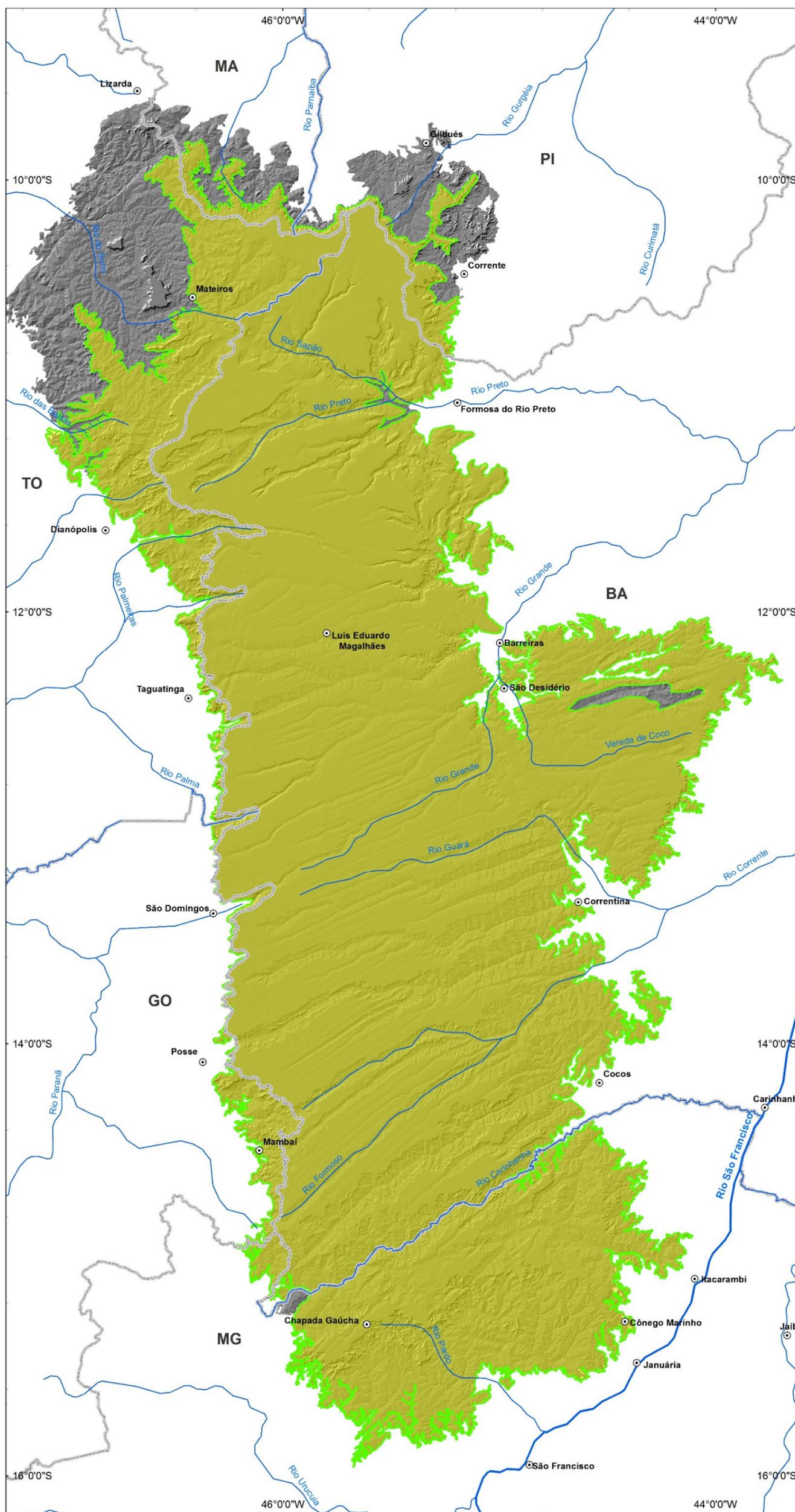
O índice AVI representa fisicamente a resistência do aquífero ao fluxo vertical por advecção de um poluente, em unidades de tempo. Em outras palavras, significa o tempo que demora para um poluente atravessar as diversas camadas não saturadas, até atingir o aquífero.

Segundo Paralta *et al.* (2005), o índice é adequado para sistema multicamada, mas pode ser aplicado a um sistema freático, por simplificação, onde se admite apenas uma camada (equivalente à zona vadosa). As classes de vulnerabilidade do método AVI são mostradas no Quadro 8.1.

QUADRO 8.1 - CLASSES DE VULNERABILIDADE DO MÉTODO AVI

<i>Classes de Vulnerabilidade - AVI</i>		
<i>c (anos)</i>	<i>Log c</i>	<i>Vulnerabilidade</i>
0 a 10	< 1	Extremamente alta
10 a 100	1 a 2	Alta
100 a 1.000	2 a 3	Moderada
1.000 a 10.000	3 a 4	Baixa
> 10.000	> 4	Extremamente baixa

Este método não conseguiu individualizar no terreno outra classe de vulnerabilidade que não fosse classificada como extremamente alta, em razão dos intervalos definidos pelo autor para as classes de vulnerabilidade (Figura 8.27). O máximo valor obtido de “c” foi 1,3 anos e os resultados estão consistentes com as elevadas condutividades hidráulicas do terreno.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- ~ Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU
- 0 - 10 anos (Vulnerabilidade extrema)

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGR
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

ANA
 ENGE CORPS
 WLM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Mapa de vulnerabilidade do SAU segundo método AVI

ESCALA NUMÉRICA
 1:1.900.000

NÚMERO FIGURA
 8.27

ESCALA GRÁFICA
 0 5 10 20 30 40 Km

Figura 8.27 - Mapa de vulnerabilidade do SAU segundo método AVI.

8.3 RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DO SAU E DO SAA

A avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas do SAU e do SAA foi baseada no mapa de usos da terra e cobertura vegetal na região de estudo. As principais classes de uso identificadas foram de Cerrado (florestal e herbáceo-arbustivo), usos agropecuários, áreas úmidas ou alagáveis, urbano, rios e vegetações associadas a cursos de água. Destas, o uso agropecuário cobre 53% do total da área do SAA, secundado pela cobertura vegetal de Cerrado com 46%. No SAU, o Cerrado cobre 58%, enquanto o uso agropecuário ocupa 40% da área.

Para cada classe foi atribuída uma classificação qualitativa em função do grau maior ou menor de possibilidade de comprometimento da qualidade da água subterrânea em decorrência das atividades exercidas sobre o terreno.

A classificação adotada estabeleceu três níveis de contaminação potencial variando entre baixo, moderado e elevado. Considerou-se uso com elevado potencial de contaminação as regiões urbanas; com moderado potencial de contaminação foram considerados os usos agropecuários; as demais classes foram consideradas como de baixo potencial de contaminação (Quadro 8.2).

A cada classe foi associado um peso crescente em função da classificação do potencial de contaminação, de modo que peso 1 significa baixo potencial e peso 3 elevado potencial.

QUADRO 8.2 - CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DAS CLASSES DE USO DO SOLO NAS ÁREAS DO SAU E SAA.

<i>Classes de uso do solo</i>	<i>Classificação</i>	<i>Nível</i>
Cerrado - Formação florestal	Baixo	1
Cerrado - Formação herbáceo-arbustiva	Baixo	1
Corpos de água	Baixo	1
Urbano	Elevado	3
Usos agropecuários	Moderado	2
Vegetação associada a cursos de água	Baixo	1
Áreas úmidas ou alagáveis	Baixo	

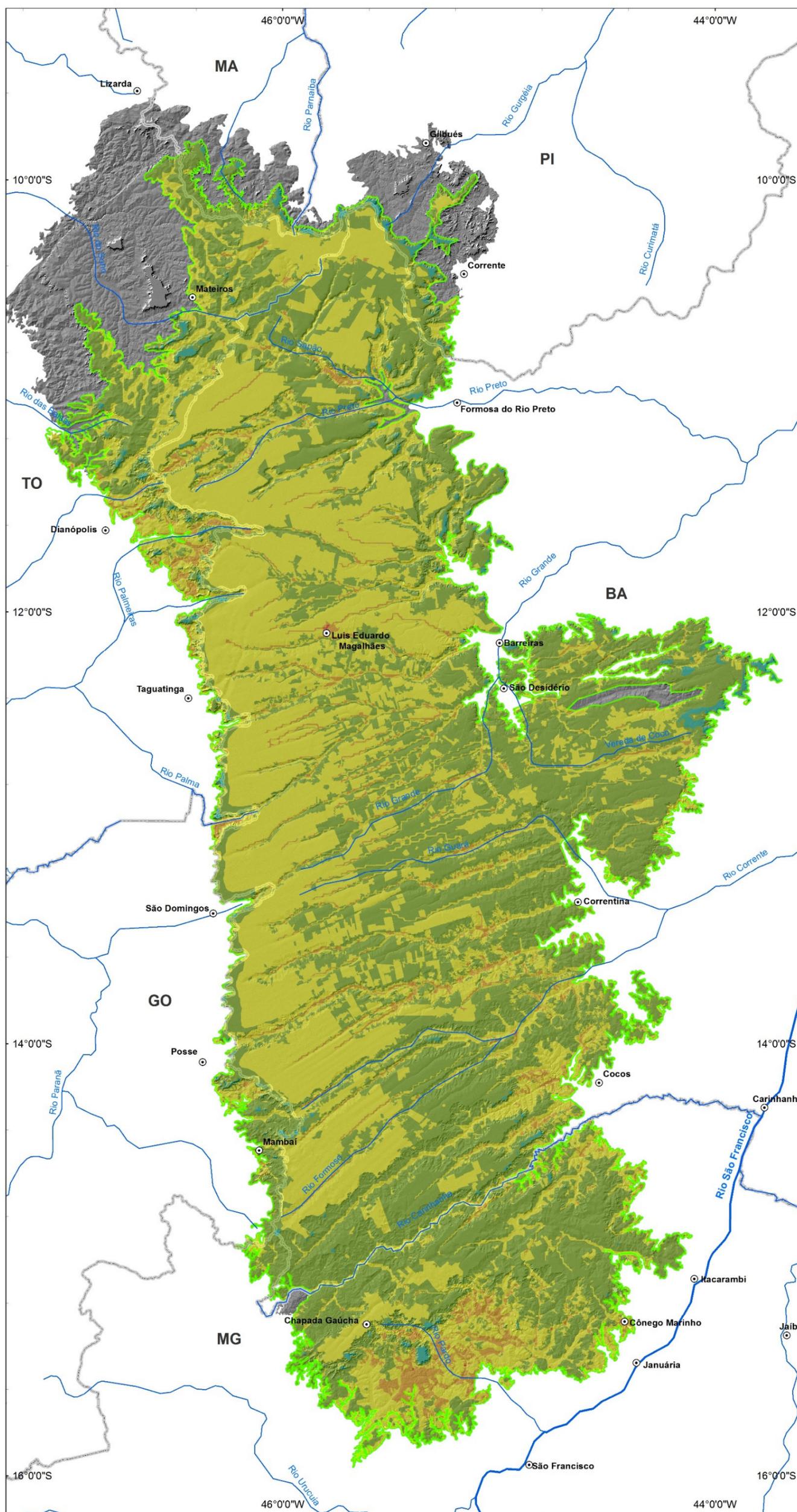
Para avaliação do risco de contaminação das águas dos aquíferos, o mapa de uso do solo foi cruzado com os mapas de vulnerabilidade (Figuras 8.25 e 8.26) elaborados com base no método GOD, com três níveis de classificação variando entre baixo, médio e alto. De modo similar ao realizado para o mapa de uso do solo, a cada nível de classificação de vulnerabilidade foi associado um peso crescente, de modo que peso 1 significa baixa vulnerabilidade e peso 3 alta vulnerabilidade. O cruzamento entre os dois mapas produziu uma matriz com cinco níveis distintos, com soma de pesos variando de 2 a 6 (Quadro 8.3).

QUADRO 8.3 - MATRIZ DE ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DE RISCO

<i>Matriz de análise</i>					<i>Classificação de Risco</i>	
Uso do solo	Vulnerabilidade				2	Insignificante
		Peso 1	Peso 2	Peso 3	3	Baixo
	Peso 1	2	3	4	4	Moderado
	Peso 2	3	4	5	5	Alto
	Peso 3	4	5	6	6	Extremo

A cada uma das cinco classes de soma de peso da matriz de análise foi atribuída uma classificação qualitativa, como se segue: insignificante (2), baixo (3), moderado (4), alto (5) e extremo (6). Assim, a classe de risco extremo significa que ao terreno de alta vulnerabilidade natural está associada uma atividade de elevado potencial de contaminação das águas subterrâneas; por outro lado, a classe de risco insignificante mostra que ao terreno de baixa vulnerabilidade natural está associada uma atividade de baixo potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Os mapas de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas (Figuras 8.28 e 8.29) mostram que 49% da área de ocorrência do SAU apresenta risco baixo e 47% risco moderado, enquanto 46% da área de ocorrência do SAA apresenta risco moderado e 31% risco baixo.



Mapa de localização da área de estudo

Convenções Cartográficas

- Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Limite Estadual
- Massas d'água

Legenda

- ~ Rio São Francisco
- SAU (MDT)
- Limites operacionais do SAU

Risco Potencial de Contaminação

Classificação

- Insignificante
- Baixo
- Moderado
- Alto
- Extremo

Datum Horizontal: SAD/69
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° WGr
 Acrescidas as constantes: 10.000 km e 500 km, respectivamente

PROJEÇÃO GEOGRÁFICA

ANA
 ENGE CORPS
 WALM

Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Uruçua e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada

TÍTULO
 Mapa de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do SAU

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.900.000
 NÚMERO FIGURA: 8.28

ESCALA GRÁFICA: 0 5 10 20 30 40 Km

Figura 8.28 - Mapa de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do SAU.

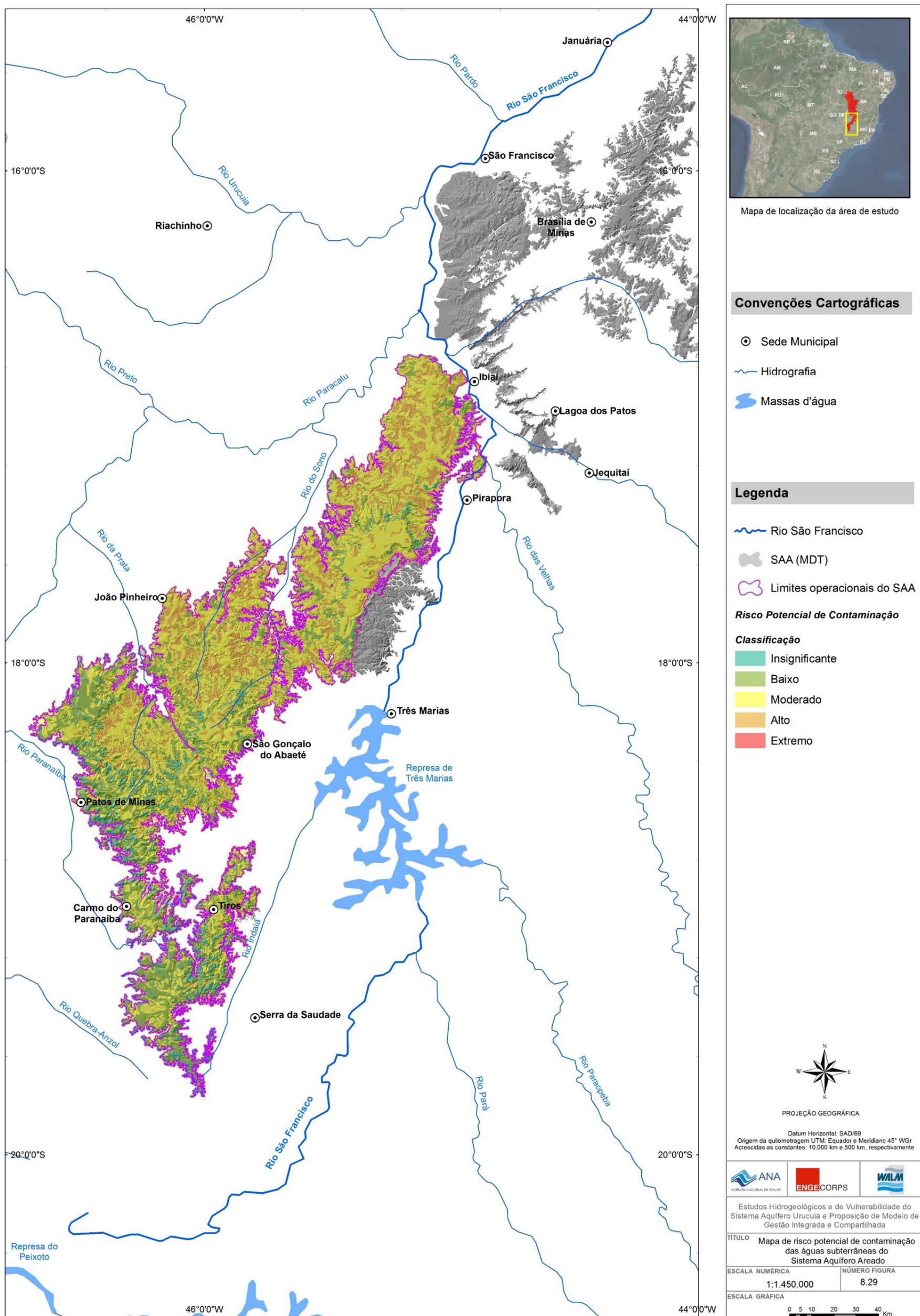


Figura 8.29 - Mapa de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do SAA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM JUNIOR, V. & LIMA, O. A. L. de. 2007. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio Das Fêmeas – BA usando Resistividade e Polarização Elétrica Induzida. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol 25 (2): 117 - 129.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. ANA/GEF/PNUMA/OEA. Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). 106 p., 2004.
- ANA – Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013/Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2013. 432 p.: II.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., 381p. London, 1992.
- BORGES, P. A. & BERNHOFER, C. Desenvolvimento de um Sistema de Gestão Integrada - Mitigation of growing stress on water resources in Brasília/DF - Development of Regional Climate Change Scenarios using Statistical Downscaling. CCRR-2013 Dresden Mai 27th, 2013.
- CAMPOS, J. E. & DARDENNE, M. A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27 (3): 269-282. 1997a.
- CAMPOS, J. E. & DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*. 27(3):283-294. 1997b.
- CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais 1981. 2º Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro – Recursos Naturais. Belo Horizonte.
- COMBALICER, E. A.; LEE, S. H.; AHN, S.; KIM, D. Y.; IM, S. Comparing groundwater recharge and base flow in the Bukmoongol small-forested watershed, Korea. *J. Earth Syst. Sci.* 117, No. 5, pp. 553–566, 2008.
- COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 27, pp. 526-534, 1946.
- COSTA – Consultoria e Serviços Técnicos e Ambientais Ltda. Plano diretor dos recursos hídricos da bacia do rio Mundaú. Secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Irrigação. Maceió. Alagoas. 746 p., 1999.
- CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2004. Nova Carta ao Milionésimo do Brasil. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Sistema de Informações Geográficas – SIG. CD-ROM

- CPRM - Serviço Geológico do Brasil & UFBA - Universidade Federal da Bahia 2007. Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Urucuia: Bacias Hidrográficas dos Rios Arrojado e Formoso. Caracterização Geológica e Geométrica dos Aquíferos - Revisão Geológica e Levantamento Geofísico. CR-ROM.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. Hidrologia subterrânea. 2ª ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2v, 2350 p., 1996.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo: v.1 e v.2, 1976.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. CD-ROM, 2005.
- DWR – California Department of Water Resources. Basic groundwater concepts. Bulletin n. 246. p., 2003.
- EATON, A. D., CLESCERI, L. S.; RICE, E. W.; GREENBERG, A. E.; FRANSON, M. A. H. (editors). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater: Centennial Edition. 21st Edition. ISBN: 0875530478. American Public Health Association. Washington, D.C. 1368 p., 2005.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. (Tradução de Ricardo Hirata, Sueli Yoshinaga, Seiju Hassuda e Mara Akie Iritani). Boletim do Instituto Geológico, n.10, 92p. 1993.
- FRANKE, O. R.; REILLY, T. E.; BENNET, G. D. Definition of Boundary and Initial Conditions in the Analysis of Saturated Ground-Water Flow Systems – An Introduction. Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey. Applications of Hydraulics, Books 3: Chapter B5, Reston, Virginia, USA, 1987.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood, USA. 604 p. 1979.
- FREEZE, R.A.; WHITERSPOON, P.A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. Water Resources Research. V. 3 p. 623-624, 1967.
- GASPAR, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. 158p. 2006.
- HARBAUGH, A. A Computer Program for Calculating Subregional Water Budgets Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model. U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392. Reston, Virginia, 1990.

- LIAZI, A.; MANCUSO, M. A., CAMPOS, J. E. & ROCHA, G. A. 2007. Outorga Integrada: águas superficiais e águas subterrâneas. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo. Anais. 17p.
- MACE, R. E.; MULLICAN, W. F.; WAY, T. Estimating Groundwater Availability in Texas. Texas Water Development Board – TWDB. Texas. 16 p., 2001.
- MARTINS, E. S.; LOPES ASSAD, M. L. R. C.; CAMPOS, J. E. G. 1993. Comportamento de solos desenvolvidos de arenito Urucuia. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 24, Goiânia. Anais, 1: 171 – 171.
- MENDONÇA, J. O. 2006. O potencial de crescimento da produção de grãos no Oeste da Bahia. Bahia Agríc., v.7, n.2. p. 38-46.
- NASCIMENTO K. R. F. (Coord.) 2003. Uso Conjunto das Águas Superficiais e Subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Fêmeas - BA. Relatório Final (Subprojeto 3.2 – Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA). Disponível em: www.ana.gov.br/gefsbr/gefsf.
- NEUMAN, S. P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research*, vol. 11, no. 2, pp. 329-342, 1975.
- NIMMO, J. R.; HEALY, R. W.; STONESTROM, D. A. Aquifer Recharge. In: Anderson, M.G., and Bear, J., eds., *Encyclopedia of Hydrological Science: Part 13. Groundwater*: Chichester, UK, Wiley, v. 4, p. 2229-2246, 2005.
- PARALTA, E. A.; FRANCES, A. P. & RIBEIRO, L. F. Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva Quadro da Água. 7ª SILUSBA. Évora. 16 p. 2005.
- PARKHURST D. L.; APPELO P. User's guide to Phreeqc (Version 2) – A computer program for speciation. speciation. batch-reaction. one-dimensional transport. and inverse geochemical calculations: Denver: USGS, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310p., 1999.
- PAULA e SILVA, F. 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 166 p.
- PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Primeiro Relatório de Avaliação Nacional. Volume Especial – Sumário Executivo. COPPE-UFRJ, 31p., 2012.
- PIPER, A. M. A. A. Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Reprinted: *American Geophysical Union Transactions*, v.25, p. 914-923, 1944.

- PORTARIA 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011 – Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
- REILLY, T. E.; FRANKE, O. L.; BUXTON, H. T.; BENNETT, G. D. A conceptual framework for ground-water solute-transport studies with emphasis on physical mechanisms of solute movement. U.S. Geol. Survey Water-Res. Inv. Rept. 87-4191: 44 p., 1987.
- RESOLUÇÃO 357 DE 17 DE MARÇO DE 2005 – Ministério do Meio Ambiente e Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências
- RESOLUÇÃO 396 DE 03 DE ABRIL DE 2008 – Ministério do Meio Ambiente e Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
- RISSER, D. W.; CONGER, R. W.; ULRICH, J. E.; ASMUSSEN, M. P. Estimates of ground water recharge based on streamflow-hydrograph methods – Pennsylvania; USGS Open-file Report 2005-1333, 30p., 2005.
- ROCHA, G. A. (org.). Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Nota Explicativa. DAEE, IG, IPT, CPRM. São Paulo. 119 p., 2005.
- SCANLON, B. R.; DUTTON, A. R.; SOPHOCLEOUS, M. A. Groundwater Recharge in Texas: The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Submitted to Texas Water Development Board, 2003.
- SCHICHT, R. J.; WALTON, W. C. Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois. State Water Surv. Rep. Invest., 40, 40 p., 1961.
- SCHUSTER H. D. M; SILVA F. F.; TEIXEIRA S. L.; BATISTA L. H. G. & FREITAS W. A. 2002. Estudos Hidrogeológicos do Aquífero Urucuia no Oeste baiano para Obtenção de Parâmetros nas outorgas de mananciais Subterrâneos. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12, Santa Catarina, CD-ROM.
- SRH-BA – Superintendência de Recursos Hídricos – Bahia. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco ANA/GEF/PNUMA/OEA). Uso Conjunto das Águas Superficiais e Subterrâneas da Sub-Bacia do Rio das Fêmeas - BA. Relatório final de avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Urucuia – BA, 2002.
- STIFF, H. A. JR. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Reprinted: Journal of Petroleum Technology, Oxford, v. 3, n. 10, p. 15-16, 1951.

- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer Vulnerability Index: GIS-Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping, Canadian Water Resources, vol. 18, nº1, 1993.
- WANG, H. F.; ANDERSON, M. P. Introduction to Ground-water Modeling-Finite Difference and Finite Element Methods. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 237 p. 1982.
- WHETTON, P.; HENNESSY, K., CLARKE, J. et al. Use of Representative Climate Futures in impact and adaptation assessment. Climatic Change, v. 115, p. 433-442, 2012.



CONSORCIO



MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

