



**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E  
SUPERFICIAIS NA BACIA DO RIO DAS FÊMEAS, SISTEMA AQUÍFERO  
URUCUIA - BAHIA**

**Viviane Cristina Vieira da Cunha**

Belo Horizonte  
Junho/2017

A presente Dissertação de Mestrado, intitulada “**Avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais na Bacia do Rio das Fêmeas, Sistema Aquífero Urucuia-Bahia**”, de autoria de **Viviane Cristina Vieira da Cunha**, foi defendida e aprovada em 30 de junho de 2017 pela Banca Examinadora abaixo assinada.

Belo Horizonte, 30 de junho de 2017.



Profª. Dra. Stela Dalva Santos Cota  
CDTN – Orientadora



Prof. Dr. Rubens Martins Moreira  
CDTN



Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão  
CPRM

Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais  
e Materiais.**

**AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E  
SUPERFICIAIS NA BACIA DO RIO DAS FÊMEAS, SISTEMA AQUÍFERO  
URUCUIA - BAHIA**

Viviane Cristina Vieira da Cunha

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais como parte dos requisitos para obtenção do grau de mestre.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio Ambiente

Orientadora: Prof. Dra. Stela Dalva Santos Cota

Belo Horizonte  
Junho/2017

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de inspiração e força.

A todos os membros da minha família, e em especial aos meus pais, Lucas Pereira da Cunha e Maria de Fátima Vieira da Cunha, aos meus irmãos Márcio Vieira da Cunha e Karina Patrícia Vieira da Cunha, e à minha avó Josefa Maria de Oliveira (*in memoriam*) por todo amor, alegrias, apoio, por serem meus exemplos e sempre estarem na torcida pelo meu sucesso.

À minha orientadora Stela Dalva Santos Cota, pelo acolhimento, confiança, compreensão, incentivo, dedicação e pela oportunidade de aprendizado.

À Maria Antonieta Alcântara Mourão pelo suporte, estímulo, paciência, amizade e por estar sempre disposta a compartilhar seu conhecimento.

À Lorraine Silva pelo companheirismo durante todo esse período do mestrado e por tantas vezes me emprestar os ouvidos nos momentos de cansaço.

A todos os colegas da CPRM com quem pude conversar, tirar dúvidas, e que sempre se mostraram dispostos a ajudar.

Aos colegas e professores do CDTN pelo compartilhamento do conhecimento.

À DHI pela concessão da licença para estudo do software MIKE SHE.

Por fim, agradeço a todos os amigos nos quais pude encontrar incentivo e confiança.

## RESUMO

Nos últimos anos tem-se percebido a necessidade do desenvolvimento de estudos integrados de águas subterrâneas e superficiais, visando, sobretudo, a gestão conjunta dos recursos hídricos. Entre as várias técnicas empregadas nestes estudos, destaca-se o modelamento numérico, que proporciona uma visão holística dos dados e, além disso, é capaz de fazer previsões através da simulação de cenários futuros. Neste panorama o presente estudo se propôs a desenvolver um modelo para avaliar a dinâmica de fluxo e a interação entre as águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas e as águas subterrâneas do Aquífero Urucuia, no oeste do estado da Bahia, utilizando o software MIKE SHE. A seleção da área de estudo foi baseada tanto na alta densidade de pontos de monitoramento ambiental (piezometria, pluviometria e fluviometria) e no elevado número de estudos de caracterização geológica, hidrogeológica e geofísica na Bacia do Rio das Fêmeas, quanto no fato de o Aquífero Urucuia ainda representar uma fronteira de estudo devido ao seu elevado potencial hidrogeológico, ao seu uso para suprir a demanda de água para atividade agrícola na região, e à sua colaboração para manutenção do escoamento de base de afluentes do Rio São Francisco. No modelo hidrogeológico conceitual foram identificadas, com base na pesquisa bibliográfica, três unidades hidrogeológicas na região, o Aquífero livre raso, o Aquífero livre profundo e o Aquífero semi-confinado. Verificou-se também que os limites da bacia hidrográfica não correspondem aos divisores de fluxo d'água subterrânea no Aquífero, foi possível identificar duas bacias hidrogeológicas, a leste, que contribui com fluxo de base do Rio das Fêmeas, e o oeste que contribui para a Bacia do Rio Paranã, afluente do Rio Tocantins. A precipitação pluviométrica média (1972 a 2016), na bacia, é de 1174.8 mm/ano. Os resultados das estimativas de recarga foram entre 15% e 25% da pluviometria. O escoamento de base médio (1984-2011) nos principais cursos d'água da bacia foi estimado em 39.5 m<sup>3</sup>/s. Quanto à evapotranspiração, os dados bibliográficos indicam valores entre 917 mm/ano a 972 mm/ano. O outro item que contribui para o balanço hídrico são as captações de água subterrânea por meio de poços, cuja estimativa foi de 1.8 m<sup>3</sup>/s no total. O fluxo regional d'água subterrânea na bacia hidrogeológica leste é para NE e localmente na direção dos cursos d'água. O Modelo Numérico foi calibrado tanto em regime permanente (2012) quanto em regime transiente (2013-2015). O coeficiente de armazenamento, inserido no transiente, foi calibrado em 10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>. O período de simulação foi de 20 anos (2015-2035) e mostrou que a redução da pluviometria em 50% a partir de 2016, e o aumento de 1% por ano das vazões extraídas pelos poços de bombeamento ocasionam a redução na recarga e a conseqüente diminuição de 25% no fluxo de base dos rios, a diminuição de 18% do fluxo da saída oeste e a redução média do NA de 5 metros de profundidade, variando de 1.3 a 12.4 m.

## ABSTRACT

The need for the development of integrated studies of groundwater and surface water, mainly aiming at the joint management of water resources, has recently been realized. Among several techniques used in these studies, we highlight the numerical model, which provides an overview of the data and, in addition, is able to make predictions through the simulation of future scenarios. In this panorama the present study proposed to develop a model to evaluate the flow dynamics and the interaction between the surface water of the Fêmeas river basin and the groundwater of the Urucuia Aquifer, in the western state of Bahia, using the Software MIKE SHE. The selection of the study area was based on the high density of environmental monitoring points (piezometry, rainfall and fluviometry) and the high number of geological, hydrogeological and geophysical characterization studies in the Fêmeas river basin, as well as on the fact that the Aquifer Urucuia still represent a study frontier due to its high hydrogeological potential, its use to supply the water demand for agricultural activity in the area, and its collaboration to maintain the base flow of tributaries of the São Francisco River. In the conceptual hydrogeological model, three hydrogeological units were identified in the region, Livre Raso Aquifer, Livre Profundo Aquifer and Semi-Confinado Aquifer. It was also found that the watershed boundaries do not correspond to the groundwater flow dividers in the Aquifer, it was found to identify two hydrogeological basins, in the east, which contributes to the base flow of the Fêmeas River, and in the west that contributes to The Paranã River Basin, tributary of the Tocantins River. The average rainfall (1972 to 2016) is 1174.8 mm/year. The results of recharge estimates were between 15% and 25% of rainfall. The mean base flow (1984-2011) in the main rivers of the basin was estimated at 39.5 m<sup>3</sup>/s. Regarding evapotranspiration, the bibliographic data indicate values between 917 and 972 mm/year. The other item that contributes to the water balance is the extraction of groundwater by means of wells, whose estimate was 1.8 m<sup>3</sup>/s in total. The regional flow of groundwater in the eastern hydrogeological basin is to NE and locally to the rivers. The numerical model was calibrated in both permanent (2012) and transient (2013-2015) regimes. The storage coefficient, inserted in the transient, was calibrated at 10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>. The simulation period was 20 years (2015-2035) and showed that the reduction of rainfall by 50% from 2016, and the increase of 1% per year in the flows from the pumping wells lead to a reduction in recharge and resulting in a 25% decrease in the flow of the rivers, a decrease of 18% in the outflow from the west and an average reduction of NA of 5 meters in depth, varying from 1.3 to 12.4 m.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANA- Agência Nacional de Águas

AROOT - Profundidade máxima das raízes

ASub-ASup - Águas Subterrâneas e Superficiais

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

$ET_{ref}$  - Evapotranspiração potencia

IAF - Índice de Área Foliar

IP - Polarização Induzida

K - Condutividade Hidráulica

MDE – Modelo Digital de Elevação

NA - Nível d'água Subterrânea

RHN - Rede Hidrometeorológica Nacional

RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas

SAU - Sistema Aquífero Urucuia

SEV - Sondagem Elétrica Vertical

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SRH-BA - Secretaria de Recursos Hídricos da Bahia

$S_y$  – Porosidade Efetiva

UFBA - Universidade Federal da Bahia

WTF - Water Table Fluctuation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de Fluxo de Águas Subterrâneas. ....	6
Figura 2 - Esquema ilustrativo dos rios efluentes (A) e influentes (B). ....	7
Figura 3 - Configuração hidrológica esquemática apresentando cenários de condições naturais (A) e de exploração (B e C). ....	11
Figura 4 - Principais modelos de interação ASub-ASup. ....	18
Figura 5 - Representação esquemática da estrutura modular do MIKE SHE mostrando os componentes do modelo. ....	23
Figura 6 - Mapa de Localização da Área de Estudo. ....	30
Figura 7 - Hidrografia da Bacia do Rio das Fêmeas e entorno. ....	31
Figura 8 - Pluviometria média mensal na Bacia do Rio das Fêmeas. ....	33
Figura 9 - Superfície topográfica da bacia do Rio das Fêmeas. ....	34
Figura 10 - Solos na Bacia do Rio das Fêmeas. ....	35
Figura 11 - Uso e ocupação da terra na bacia do Rio das Fêmeas. ....	36
Figura 12 - Contexto Geológico da Bacia Sanfranciscana. ....	38
Figura 13 - Coluna estratigráfica da Bacia Sanfranciscana. ....	40
Figura 14 - Mapa Geológico simplificado da sub-bacia Urucuia. ....	42
Figura 15 - Mapa Geológico da Bacia do Rio das Fêmeas. ....	43
Figura 16 - Área efetiva do Sistema Aquífero Urucuia e posicionamento aproximado do eixo divisor do fluxo subterrâneo. ....	47
Figura 17 - Mapa das áreas de recarga do Sistema Aquífero Urucuia e áreas de recarga comprometidas pela agricultura, até o ano de 2000. ....	49
Figura 18 - Delimitação espacial dos subtipos de aquífero do Sistema Aquífero Urucuia. ....	51
Figura 19 - Mapa de isópacas e perfis geológicos das rochas do Grupo Urucuia – Resultados da investigação geofísica. ....	55
Figura 20 - Mapa de localização dos pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas. ....	59
Figura 21 - Significado gráfico das variáveis utilizadas no cálculo de recarga pelo método WTF. ....	62
Figura 22 - Representação da discretização horizontal. ....	65
Figura 23 - Representação da discretização vertical (Perfil 8600000). ....	65
Figura 24 - Discretização vertical. (a) topo – superfície topográfica, (b) base – superfície do embasamento. ....	66
Figura 25 - Condições de contorno aplicadas no modelo numérico. ....	67
Figura 26 - Polígonos de Thiessen definidos para as estações pluviométricas da área de estudo. ....	68
Figura 27 - Mapa de distribuição de condutividades hidráulicas (K). ....	69
Figura 28 - Poços de bombeamento inseridos no modelo numérico calibrado em regime transiente. ....	71
Figura 29 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245015. ....	74
Figura 30 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245015. ....	74
Figura 31 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1246001. ....	74
Figura 32 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1246001. ....	74
Figura 33 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245014. ....	75
Figura 34 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245014. ....	75
Figura 35 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245005. ....	75
Figura 36 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245005. ....	75
Figura 37 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1346000. ....	76
Figura 38 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1346000. ....	76
Figura 39 - Vazões mínimas, médias e máximas mensais das estações de monitoramento pluviométrico. ....	77
Figura 40 - Vazões médias por ano hidrológico na estação 46455000. ....	78
Figura 41 - Gráficos das séries históricas de monitoramento do nível d'água subterrânea. ....	80
Figura 42 - Estimativa de recarga pelo método da separação do escoamento de base (estação 46455000). ....	84
Figura 43 - Representação esquemática do modelo hidrológico/hidrogeológico conceitual da Bacia do Rio das Fêmeas. (I) Aquífero Livre Profundo, (II) Aquífero Livre Regional e (III) Aquífero Semi Confinado. ....	85
Figura 44 - Mapa Potenciométrico da Bacia do Rio das Fêmeas (média do período de 2011-2015). ....	87
Figura 45 - Áreas de recarga e seus respectivos valores de calibração em regime permanente. ....	88
Figura 46 - Mapa de transmissividade do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas calibrada no modelo numérico. ....	90
Figura 47 - Gráfico de calibração dos níveis d'água em regime permanente. ....	91



<i>Figura 48 - Superfície equipotencial do nível d'água para o ano de 2012 – Calibração em permanente.</i>	92
<i>Figura 49 – Perfil A-B (SW-NE) mostrando a superfície do NA calibrada em regime permanente. ....</i>	93
<i>Figura 50 - Perfil C-D (NW- SE) mostrando a superfície do NA calibrada em regime permanente.....</i>	93
<i>Figura 51 - Gráfico de calibração dos níveis d'água em regime transiente. ....</i>	96
<i>Figura 52 - Valores calculados para a recarga, vazão nos cursos d'água e fluxo na borda oeste da Bacia do Rio das Fêmeas durante o período de calibração em regime transiente.....</i>	98
<i>Figura 53 - Superfície equipotencial do nível d'água simulada para o final da calibração em transiente (30/06/2015). ....</i>	98
<i>Figura 54 - Perfil A-B (SW-NE) mostrando a superfície do NA para o final da calibração em regime transiente (30/06/2015). ....</i>	99
<i>Figura 55 - Perfil C-D (NW-SE) mostrando a superfície do NA para o final da calibração em regime transiente (30/06/2015). ....</i>	99
<i>Figura 56 - Gráficos de variação dos níveis d'água no período de simulação de Jul/2015 a Dez/2035. ....</i>	101
<i>Figura 57 - Valores calculados para a recarga, vazão nos cursos d'água e fluxo na borda oeste da Bacia do Rio das Fêmeas durante o período de simulação (2015-2035).....</i>	102

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas. ....</i>	58
<i>Tabela 2 - Médias, máximos e mínimos históricos de pluviometria. ....</i>	73
<i>Tabela 3 - Recargas calculadas pelo método da flutuação do nível d'água subterrânea. ....</i>	83
<i>Tabela 4 - Valores de recarga calibrados em regime permanente. ....</i>	88
<i>Tabela 5 - Cargas hidráulica da condição de contorno carga fixa calibradas em regime permanente. ....</i>	89
<i>Tabela 6 - Propriedades hidrodinâmicas calibradas no regime permanente. ....</i>	89
<i>Tabela 7 - Resultados de cargas hidráulicas simuladas versus observadas (médias de 2012) para os poços de monitoramento utilizados na calibração em regime permanente. ....</i>	91
<i>Tabela 8 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno – regime permanente. ....</i>	94
<i>Tabela 9 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno e por ano – regime transiente. ....</i>	97
<i>Tabela 10 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno e por ano durante a simulação (2015-2035).....</i>	102

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>II</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIações .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 JUSTIFICATIVAS.....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS.....	5
2.1.1 <i>Controles Geomorfológicos, Hidrogeológicos e Climáticos</i> .....	6
2.1.2 <i>Zona não saturada</i> .....	8
2.1.3 <i>Disponibilidade dos Recursos Hídricos e Interação ASub-ASup</i> .....	9
2.1.4 <i>Técnicas para quantificar a Interação ASub-ASup</i> .....	11
2.1.4.1 Traçadores de Calor .....	12
2.1.4.2 Métodos baseados na lei de Darcy .....	13
2.1.4.3 Aplicação do Balanço de Massa .....	14
2.1.4.4 Traçadores Artificiais e Ambientais .....	14
2.1.4.5 Infiltrômetros.....	15
2.1.4.6 Modelamento Numérico .....	16
2.2 MODELAMENTO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO ASUB-ASUP .....	17
2.3 MIKE SHE.....	21
2.3.1 <i>Características Principais</i> .....	22
2.3.1.1 Evapotranspiração .....	23
2.3.1.2 Fluxo na Zona não Saturada .....	25
2.3.1.3 Fluxo na Zona Saturada .....	26
2.3.1.4 Fluxo Superficial .....	27
2.3.1.5 Fluxo nos Canais .....	27
2.3.2 <i>Aplicações do MIKE SHE</i> .....	28
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>30</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO .....	30
3.2 HIDROGRAFIA .....	31
3.3 CLIMA.....	32
3.4 GEOMORFOLOGIA .....	33
3.5 PEDOLOGIA.....	35
3.6 USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL .....	36
3.7 GEOLOGIA .....	37
3.7.1 <i>Bacia Sanfranciscana</i> .....	37
3.7.1.1 Grupo Urucua .....	39
3.7.1.2 Formação Chapadão.....	41
3.7.2 <i>Geologia Local</i> .....	43
3.8 HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA.....	44
3.8.1 <i>Zona Vadosa</i> .....	47
3.8.2 <i>Recarga</i> .....	48
3.8.3 <i>Subtipos de Aquíferos e Distribuição Espacial</i> .....	50
3.8.4 <i>Parâmetros Hidrodinâmicos</i> .....	52
3.8.5 <i>Análises Isotópicas</i> .....	53
3.8.6 <i>Geofísica</i> .....	53
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>57</b>

4.1	SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	57
4.2	ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	57
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	57
4.4	DADOS DE MONITORAMENTO.....	58
4.5	MODELO CONCEITUAL DE FLUXO.....	60
4.5.1	<i>Escoamento de base e cálculo de recarga</i> .....	61
4.5.2	<i>Calculo de recarga pelo método WTF</i> .....	62
4.6	MODELO NUMÉRICO.....	63
4.6.1	<i>Malha do Modelo</i> .....	64
4.6.2	<i>Condições de Contorno</i> .....	66
4.6.3	<i>Propriedades Hidrodinâmicas</i> .....	68
4.6.4	<i>Calibração em Regime Permanente</i> .....	70
4.6.5	<i>Calibração em Regime Transiente</i> .....	70
4.7	SIMULAÇÃO.....	72
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
5.1	MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO.....	73
5.1.1	<i>Pluviometria</i> .....	73
5.1.2	<i>Vazões dos cursos d'água</i> .....	76
5.1.3	<i>Níveis D'água Subterrânea</i> .....	78
5.2	MODELO CONCEITUAL.....	81
5.2.1	<i>Unidades Hidrogeológicas</i> .....	81
5.2.2	<i>Balanço Hídrico</i> .....	82
5.2.3	<i>Potenciometria</i> .....	86
5.3	MODELO NUMÉRICO.....	87
5.3.1	<i>Calibração em Regime Permanente</i> .....	87
5.3.2	<i>Calibração em regime transiente</i> .....	94
5.3.3	<i>Simulações</i> .....	100
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Por um longo período a hidrologia e a hidrogeologia se desenvolveram como ciências independentes ou tenuamente relacionadas. Nos últimos anos, no entanto, percebeu-se que as águas superficiais e subterrâneas estão intimamente conectadas, elas se movimentam entre os aquíferos, rios, lagos, mares, oceanos e a atmosfera constituindo o ciclo hidrológico. Assim, a necessidade do desenvolvimento de estudos integrados de águas subterrâneas e superficiais (ASub-ASup), visando sobretudo a gestão conjunta dos recursos hídricos, tornou-se tema de diversas pesquisas e ainda permanece uma questão bastante desafiante.

Existem várias técnicas para identificar e quantificar a interação ASub-ASup, dentre elas destaca-se o modelamento numérico integrado. Inicialmente, tanto os modelos hidrológicos quanto os modelos de águas subterrâneas foram utilizados isoladamente, no entanto, desde que a interação entre ASub-ASup tornou-se alvo de estudo, vários modelos foram desenvolvidos para integrar tanto a porção superficial quanto a subterrânea do ciclo hidrológico. Os modelos numéricos representam uma ferramenta bastante poderosa no estudo de interação ASub-ASup, já que eles proporcionam uma visão holística dos dados e, além disso, são capazes de fazer previsões através da simulação de cenários futuros.

Todos os métodos aplicados para melhorar o entendimento sobre a interação ASub-ASup esbarram em uma questão fundamental, a escassez de dados básicos, tais como informações de caracterização regional e local, e séries históricas de monitoramento ambiental (pluviometria, vazão dos cursos d'água, níveis d'água subterrânea, qualidade das águas, entre outros).

No Brasil, os programas de monitoramento ambientais têm sido ampliados ao longo dos anos, com destaque para a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), já com várias décadas de funcionamento, e a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), que conta com até seis anos de séries históricas.

Frente a este cenário, o presente trabalho engloba o uso de dados hidrogeológicos e hidrológicos disponibilizados, respectivamente, pela RIMAS e RHN, para elaboração do modelo conceitual de fluxo, bem como a montagem e

calibração do modelo numérico utilizando o software MIKE SHE, na bacia do Rio das Fêmeas, situada no contexto hidrogeológico do Sistema Aquífero Urucuia (SAU).

No SAU, a dinâmica de interação entre águas subterrâneas e superficiais é uma característica marcante já que se trata de um aquífero principalmente livre, poroso e governado pela área de drenagem das sub-bacias associadas. A recarga se processa diretamente em toda a área de exposição do aquífero e as descargas ocorrem pela rede de drenagem. O SAU apresenta um elevado potencial hidrogeológico, sendo de grande importância para o atendimento de parte da demanda de água para atividade agrícola na região, e para manutenção do escoamento de base de afluentes do Rio São Francisco.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente estudo propõe avaliar uma metodologia para a determinação da dinâmica de fluxo e da interação entre as águas superficiais e subterrâneas baseada na implantação de um modelo hidrológico integrado. O estudo foi desenvolvido para a bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas, afluente do Rio São Francisco, no contexto hidrogeológico do Aquífero Urucuia.

São objetivos específicos do trabalho:

- Elaborar um modelo conceitual de fluxo para a área, considerando a interação ASub-ASup, utilizando o conhecimento atual referente à hidrogeologia, geologia, hidrologia, bem como os dados das redes nacionais de monitoramento – RIMAS e RHN;
- Montar e calibrar um modelo numérico da área de estudo utilizando o software MIKE SHE, e empregá-lo para:
  - Simular cenário de redução pluviométrica e aumento da exploração das águas subterrâneas e avaliar o impacto nas águas superficiais;
  - Avaliar a aplicabilidade do modelo MIKE SHE a estudos hidrológicos e hidrogeológicos no Aquífero Urucuia.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

A modelagem numérica de interação ASub-ASup é uma ferramenta essencial que visa tanto melhorar a compreensão dos processos físicos dentro de uma região hidrográfica/ hidrogeológica, quanto fornecer dados quantitativos das respostas hidrológicas em função do uso e ocupação do solo e da variabilidade climática. Esses são fatores fundamentais para a gestão sustentável dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Prever os impactos do uso e manejo da terra é especialmente desafiador no Sistema Aquífero Urucuia, uma das principais unidades hidrogeológicas do país, e sobre a qual há o desenvolvimento de atividades agrícolas desde os anos 80.

Recentemente a Agência Nacional de Águas (ANA) desenvolveu os “Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada”, onde ficou claro que a atividade agrícola desenvolvida nessa região acentuou processos de degradação da qualidade e redução dos volumes das águas dos mananciais. Este fato é preocupante se levarmos em consideração que o SAU contribui com uma parcela significativa da vazão do Rio São Francisco, sobretudo no período seco (ANA, 2013). Os estudos também acrescentaram informações fundamentais sobre a caracterização do SAU, por exemplo, análises de isótopos ambientais ( $^{18}\text{O}$  - Oxigênio 18, D – Deutério,  $^{14}\text{C}$  – Carbono 14 e  $^3\text{H}$  – Trítio) cujos resultados serviram para embasar o modelo hidrogeológico conceitual.

Quando a ANA executou o estudo no Aquífero Urucuia, a rede de monitoramento RIMAS ainda estava em fase de implantação, e por isso os seus dados não foram acrescentados ao estudo. Atualmente, a RIMAS conta com um histórico de aproximadamente seis anos de monitoramento de variação do nível e qualidade d’água subterrânea. Além dos dados da RIMAS, a área de estudo conta com diversas estações pluviométricas e fluviométricas da RHN. Esses dados foram fundamentais para a elaboração deste trabalho.

A seleção da área de estudo foi baseada tanto na alta densidade de pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas, quanto no fato de o SAU ainda representar uma fronteira de estudo devido ao seu elevado potencial

hidrogeológico, ao seu uso em parte da demanda de água para atividade agrícola na região, e à sua colaboração para manutenção do escoamento de base de afluentes do Rio São Francisco.

Dentre os vários softwares que se prestam ao modelamento numérico, destaca-se o MIKE SHE, um modelo determinístico cuja proposta é integrar toda a fase terrestre do ciclo hidrológico. O MIKE SHE foi desenvolvido a partir da constatação de que os modelos de escoamento e precipitação convencionais não são adequados para muitos problemas hidrológicos urgentes, especialmente aqueles relacionados ao impacto da atividade do homem, as mudanças de uso de solos e qualidade da água (DHI, 2007).

Além das questões já citadas, as quais estão relacionadas à gestão sustentável dos recursos hídricos, outro fator que justifica a elaboração deste trabalho refere-se à implementação de metodologias para pesquisa em áreas que apresentam estresse hídrico, seja quantitativo ou qualitativo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

Muitas publicações relacionadas ao assunto foram divulgadas nas últimas décadas, entre elas destaca-se o trabalho publicado por Winter *et al.* (1998) no qual os autores apresentam de forma bastante ampla os mecanismos de interação ASub-ASup, englobando diversos tipos de corpos d'água superficial em vários terrenos. Em seguida, um artigo sobre o estado da arte, publicado por Sophocleous (2002), resumiu os conceitos fundamentais associados à relação ASub-ASup do ponto de vista hidráulico-hidrogeológico.

Uma vez que os principais conceitos foram estabelecidos, a preocupação voltou-se à aplicação de técnicas para estimar o fluxo entre ASub-ASup em diferentes escalas (ROSENBERRY; LABAUGH, 2008); (KALBUS; REINSTORF; SCHIRMER, 2006); (BECKER, 2006); (YANG *et al.*, 2012); (LEVY; XU, 2012); (GONZÁLEZ-PINZÓN *et al.*, 2015).

Com o decorrer do tempo as pesquisas de interação ASub-ASup focaram em áreas específicas como áreas alagadas (“*wetlands*”) (THOMPSON *et al.*, 2009); (ANIBAS *et al.*, 2011), regiões costeiras (WERNER *et al.*, 2013), rios e lagos (FLECKENSTEIN *et al.*, 2006).

Apesar do número de publicações relacionadas à interação ASub-ASup não ser pequeno, algumas questões precisam ser melhor estudadas, uma delas, citada por Fleckenstein *et al.* (2006), são as heterogeneidades nos aquífero e canais dos rios, e a outra, mencionada por Barthel e Banzhaf (2015) refere-se aos estudos em escalas regionais, que ainda são extremamente escassos.

No decorrer deste capítulo, uma visão geral da teoria relacionada à interação ASub-ASup e os trabalhos recentes elaborados nessa linha temática serão discutidos.



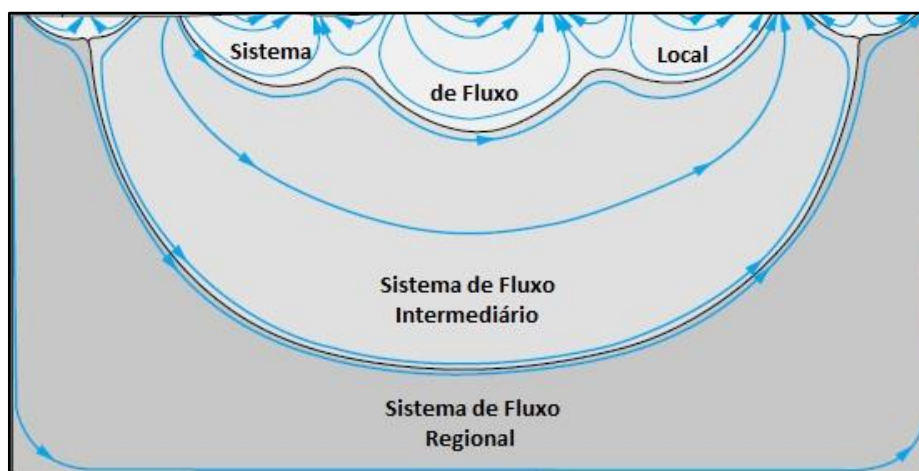
### 2.1.1 Controles Geomorfológicos, Hidrogeológicos e Climáticos

A interação ASub-ASup é controlada por diversos fatores, entre eles a geomorfologia do terreno, as características hidrogeológicas do aquífero e o clima. Estas questões foram abordadas por Sophocleous (2002) e Winter *et al.* (1998).

Diferenças na superfície topográfica são muitas vezes reproduzidas por diferenças na superfície potenciométrica nos aquíferos livres. A distribuição da condutividade hidráulica (K) nos aquíferos também contribui para o padrão de fluxo da água subterrânea que, além disso, é afetado pelo clima, já que a chuva é a principal fonte de recarga da maioria dos aquíferos.

Tóth (1963 apud SOPHOCLEOUS, 2002) identificou três sistemas de fluxo d'água subterrânea em uma bacia hidrográfica, os quais foram denominados de sistema de fluxo local, intermediário e regional. No fluxo local, a água se move próximo à zona de descarga, que pode ser uma nascente, barragem ou lago. O sistema de fluxo intermediário é caracterizado por um ou mais altos e baixos topográficos localizados entre zonas de recarga e descarga. Já no fluxo regional a água percorre maiores distâncias e geralmente a descarga está associada a grandes rios, lagos, ou mesmo ao oceano (Figura 1).

Figura 1 - Sistemas de Fluxo de Águas Subterrâneas.

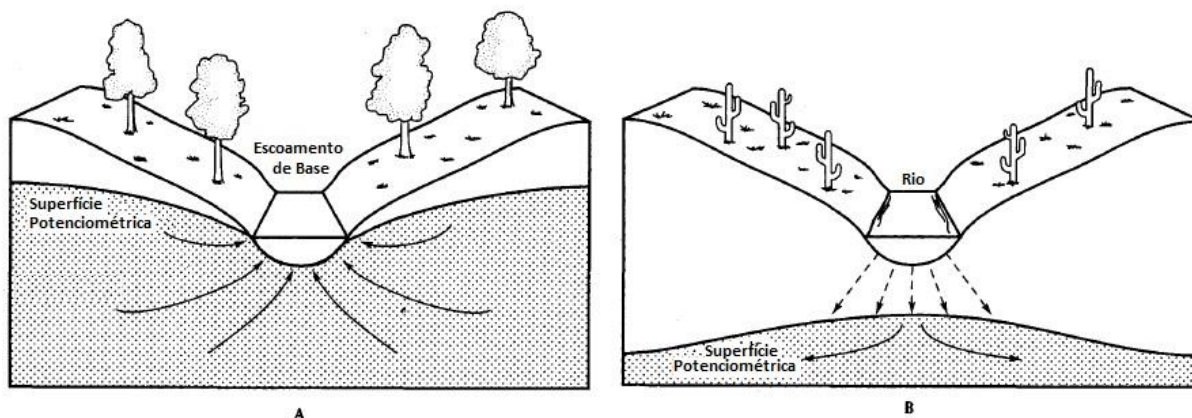


Fonte: Tóth, 1963

Áreas com topografia pronunciada tendem a ter fluxo local predominante, enquanto áreas mais planas têm sistemas de fluxo predominantemente intermediário e local. A interação de nascentes, lagos e áreas alagadas (brejos, pântanos) com a água subterrânea é governada pela posição dos corpos d'água com respeito ao sistema de fluxo d'água subterrânea (SOPHOCLEOUS, 2002).

O nível da água subterrânea tem uma relação íntima com os rios. Os rios que recebem água dos aquíferos são chamados rios efluentes. Ao contrário, os rios influentes são aqueles que recarregam os aquíferos (KARMANN, 2000). A Figura 2 apresenta um desenho esquemático da condição efluente ou influente de um rio. Cabe ressaltar que um rio pode ser efluente ou influente dependendo do período do ano, e do trecho do rio. No período seco, quando a água que está no curso d'água é praticamente o escoamento de base, verifica-se a condição efluente, no entanto, no período chuvoso o rio pode contribuir para o aquífero tornando-se influente.

Figura 2 - Esquema ilustrativo dos rios efluentes (A) e influentes (B).



Fonte: Fetter, 2001

Ainda não há um consenso sobre quais são os parâmetros geomorfológicos mais intimamente ligados ao escoamento de base, embora esteja claro que a geomorfologia da bacia hidrográfica interfere no fluxo entre aquífero e rio (PRICE, 2011). A ausência de consenso é verificada também na questão da influência das coberturas florestais no fluxo de base em bacias hidrográficas. Alguns autores defendem que as coberturas florestais estão relacionadas com baixos

valores de escoamento de base, uma vez que contribuem com o aumento da evapotranspiração, no entanto, outro grupo de pesquisadores associam as florestas ao aumento da infiltração e recarga no aquífero e conseqüente acréscimo no escoamento de base (SOPHOCLEOUS, 2002; WINTER *et al.*, 1998).

Larkin e Sharp (1992, apud SOPHOCLEOUS, 2002) estudaram a interação entre rios e aquíferos aluviais chegando a três classificações: (1) componente sub-superficial dominante (o fluxo de água subterrânea se move paralelo e na mesma direção do fluxo no curso d'água); (2) componente dominado pelo fluxo de base (o fluxo de água subterrânea se move perpendicular ao curso d'água, a direção pode ser a partir de ou para o curso d'água); e (3) misto. Os autores concluíram que o componente de fluxo de água subterrânea dominante pode ser inferido por dados geomorfológicos, como declividade do canal, sinuosidade, relação entre largura e profundidade do canal e característica do sistema de deposição fluvial. O componente sub-superficial é dominante em sistemas de canais com alto gradiente topográfico, pequenas sinuosidades e grandes proporções de largura e profundidade. O componente de fluxo de base é dominante em sistemas com características opostas ao sub-superficial, e os sistemas de fluxo misto ocorrem onde o gradiente topográfico das encostas do rio e a declividade do canal são praticamente os mesmos, e também onde a inclinação lateral do vale é negligenciável.

### **2.1.2 Zona não saturada**

A zona não saturada exerce papel fundamental na migração de água entre corpos d'água superficiais e subterrâneos. Estudos através de modelagem matemática demonstraram que, quando a superfície potenciométrica é muito profunda, então existe uma zona não saturada entre a zona de infiltração do rio e o nível d'água subterrânea. É como se existisse uma superfície potenciométrica invertida próximo ao rio (RIESENAUER, 1963 apud SOPHOCLEOUS, 2002).

Quando a superfície da água subterrânea está mais baixa que o leito do corpo d'água superficial, diz-se que a superfície está descolada. Neste caso pode

haver conexão hidráulica ou não entre as águas superficiais e subterrâneas. Bouwer e Maddock (1997, apud SOPHOCLEOUS, 2002) estudaram essa questão em rios e verificaram que, mesmo quando existe uma zona não saturada entre o rio e o aquífero, eles podem ainda assim estar conectados. A partir de determinada profundidade (profundidade crítica) do nível d'água subterrânea com relação ao leito do corpo d'água superficial não se verifica conexão hidráulica entre os dois corpos d'água. Essa profundidade depende principalmente das propriedades do solo e da altura da lâmina d'água no rio.

Winter (1983) estudou o papel da zona não saturada na interação ASub-ASup em lagos e reconheceu que a recarga ocorre inicialmente onde a zona não saturada é menos espessa e continua em áreas adjacentes. Este processo tem implicações significativas se levarmos em conta que a zona não saturada é normalmente mais fina nas proximidades dos corpos de água superficial.

### **2.1.3 Disponibilidade dos Recursos Hídricos e Interação ASub-ASup**

Outro fator que impulsiona o estudo da interação ASub-ASup é a questão do gerenciamento integrado de recursos hídricos. Entender os princípios que regem a influência que captações subterrâneas exercem nas superficiais (e vice versa) é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos (SOPHOCLEOUS, 2002).

Em situações naturais, antes da captação da água subterrânea por meio de poços ou outras obras de engenharia, os aquíferos estão na condição de um equilíbrio dinâmico, já que os anos chuvosos, quando a recarga supera a descarga, podem compensar os anos secos, quando a descarga é maior que a recarga. No entanto, ao se iniciar a captação de água subterrânea, este equilíbrio é alterado, produzindo uma perda no armazenamento do aquífero. Logo em seguida, um novo estado de equilíbrio dinâmico é desenvolvido, quando há pouca ou nenhuma perda no armazenamento. Esse novo estado é possível devido ao aumento na recarga (recarga induzida ou infiltração induzida) ou diminuição na descarga natural, ou ainda uma combinação de ambos os fatores (SOPHOCLEOUS, 2002).

O rebaixamento do nível d'água subterrânea motiva a recarga induzida e pode levar à redução do nível d'água nos rios pelos mecanismos de troca de água entre rio e aquífero discutidos anteriormente. Quantificar a infiltração induzida, que é função de muitos fatores, é muito importante para o uso conjunto da água.

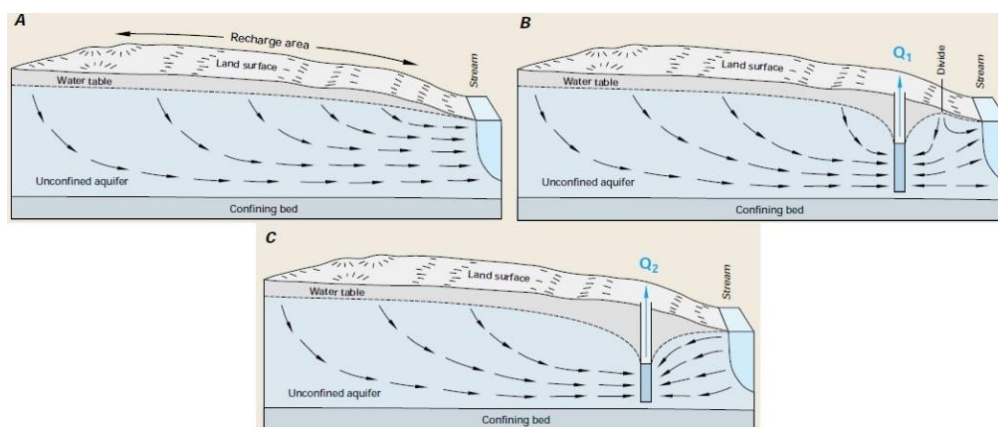
A interação ASub-ASup também é importante em situações de contaminação de águas subterrâneas por água superficial poluída, ou em situações de degradação de água superficial por descarga de água salina ou de qualidade ruim (SOPHOCLEOUS, 2002).

Para entender melhor as questões discutidas acima, Winter *et al.* (1998) idealizou o seguinte exemplo, considerando um sistema com um aquífero aluvial descarregando em um curso d'água. Um poço perfurado a determinada distância do rio forma um cone de rebaixamento no aquífero, o cone cresce à medida que a água é tirada do armazenamento do aquífero, e a periferia do cone se aproxima do rio, neste ponto a descarga do aquífero para o rio diminui ou cessa, ou a água começa a fluir do rio para o aquífero. O cone continua a se expandir com a continuidade do bombeamento até que um novo equilíbrio é encontrado, no qual a recarga induzida do rio compensa o bombeamento. O tempo para atingir o equilíbrio depende dos fatores: (1) difusividade do aquífero (razão entre transmissividade e armazenamento  $T/S$ ); e (2) distância  $x$  do poço ao rio, para um fluxo radial, um aumento de dez vezes na distância  $x$ , causa um atraso de cem vezes no tempo de resposta, levando em conta que a alteração da difusividade é linearmente proporcional ao tempo de resposta. Genericamente, se o poço estiver distante do rio, dezenas a centenas de anos podem se passar até que a influência no rio seja percebida.

Uma vez que o cone de rebaixamento do poço atinge o tamanho e a forma de equilíbrio, todo o bombeamento é balanceado pelo fluxo desviado do rio. Neste caso a captação de água subterrânea do poço de bombeamento, tem influência na captação de água superficial, na mesma taxa. O ponto crucial é que, antes do equilíbrio ser alcançado, as duas captações, subterrânea e superficial, não são as mesmas, mas quando o perímetro do cone alcança o rio, e o processo de recarga induzida a partir de corpos de água superficial se inicia, então não é possível tratar da captação das águas de forma individualizada e novas de políticas de uso da água precisam ser desenvolvidas (BALLEAU, 1988, apud WINTER *et al.*, 1998).

A Figura 3 ilustra o exemplo citado acima, no diagrama A verifica-se o sistema em condições naturais. O diagrama B mostra o poço de bombeamento interceptando parte da água subterrânea que deveria descarregar no rio. Por fim, no diagrama C o poço de bombeamento está interceptando toda a água subterrânea que deveria descarregar no rio e nas vizinhanças do poço e ainda recebendo água do rio.

Figura 3 - Configuração hidrológica esquemática apresentando cenários de condições naturais (A) e de exploração (B e C).



Fonte: WINTER *et al.*, 1998.

#### 2.1.4 Técnicas para quantificar a Interação ASub-ASup

Apesar dos numerosos estudos de interação ASub-ASup nas últimas três décadas, quantificar essas interações continua a ser desafiante e um tanto incerto. Em face de tais incertezas, Sophocleous (2002) aconselha abordar a interação ASub-ASup sob o ponto de vista multidisciplinar e em várias escalas, agregando técnicas de análises de campo e sensoriamento remoto com modelagem numérica e análises estatísticas.

Rosenberry e LaBaugh (2008), Kalbus *et al.* (2006), Levy e Xu (2012) e González-Pinzón *et al.* (2015) escreveram revisões, sob diferentes pontos de vista,

acerca dos métodos para quantificar a interação ASub-ASup, as quais são apresentadas sucintamente nos tópicos a seguir.

#### 2.1.4.1 Traçadores de Calor

Anderson (2005) e Saar (2011) escreveram artigos de revisão sobre o uso do calor como traçador de águas subterrâneas. Rosenberry e Labaugh (2008) também revisaram este tema sob o ponto de vista dos estudos de interação ASub-ASup.

Neste tipo de estudo podem ser usadas sondas de temperatura, medições *in-situ* e imagens térmicas para determinar qualitativamente locais de descarga de água subterrânea para águas superficiais.

As temperaturas também podem ser medidas em um perfil vertical a diferentes profundidades, se estendendo tipicamente de 3 a 6 metros, abaixo do leito do corpo d'água superficial (rios ou lagos), com o intuito de determinar o fluxo d'água através dos sedimentos do leito. Este método requer múltiplas medidas de temperatura ao longo de semanas ou meses e a aplicação de soluções analíticas ou numéricas baseadas na equação de transporte de calor (DOMENICO; SCHWARTZ, 1998 apud KALBUS *et al.*, 2006).

Outra abordagem utilizada nos estudos de fluxo de calor refere-se a medições de temperatura em diferentes locais no leito de um curso d'água superficial em um curto período de tempo. Neste caso, o pressuposto é que as variações de temperatura são atribuídas a variações espaciais e não a mudanças temporais. A solução deste método refere-se à relação empírica entre fluxo e temperatura definida por Conant (2004 apud ROSENBERRY e LABAUGH, 2008) que é utilizada para determinar a taxa de descarga de água subterrânea para o corpo d'água superficial.

A temperatura é um parâmetro robusto e relativamente barato de medir. As medições são rápidas e fáceis de executar, fazendo com que os métodos baseados em temperatura sejam muito atraentes para delineações detalhadas de

descarga ou recarga de águas subterrâneas. É importante ressaltar que trata-se de um método utilizado em escala bastante localizada.

#### 2.1.4.2 Métodos baseados na lei de Darcy

A relação entre o nível d'água em um corpo d'água superficial e a carga hidráulica medida em um poço próximo pode ser usada para calcular o fluxo entre ASub-ASup (LABAUGH; ROSENBERRY; WINTER, 1995; WENTZ; ROSE; WEBSTER, 1995; ZEKSTER, 1996; LEE; SWANCAR, 1997; CAMBARERI; EICHNER, 1998; PUCKETT *et al.*, 2002 apud ROSENBERRY e LABAUGH, 2008). A equação de Darcy (Equação 1) é usada para calcular o fluxo ASub-ASup ao longo de segmentos específicos da borda do corpo d'água.

$$Q = KA \frac{h_1 - h_2}{L} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

onde,

$Q$  (m<sup>3</sup>/s) é o fluxo através de um plano vertical que se estende abaixo da borda do corpo d'água superficial,

$A$  (m<sup>2</sup>) é a área do plano através do qual toda a água deve passar, seja para o corpo d'água superficial ou a partir dele,

$K$  (m/s) é a condutividade hidráulica horizontal,

$h_1$  (m) é a carga hidráulica medida no poço,

$h_2$  (m) é carga hidráulica na borda do corpo d'água superficial,

$L$  (m) é a distância do poço para a borda.

Os seguimentos de borda são selecionados levando em consideração o pressuposto que o gradiente hidráulico entre as proximidades dos poços e o corpo d'água superficial, a condutividade hidráulica dos sedimentos e a área do perfil através do qual a água flui, são uniformes ao longo do seguimento. Os fluxos através de cada seguimento ao longo de todo o corpo d'água são somados para



computar o fluxo total. A escala para aplicação deste método depende da configuração física da área de estudo e da densidade de poços de monitoramento.

#### 2.1.4.3 Aplicação do Balanço de Massa

A aplicação do balanço hídrico nos estudos de interação ASub-ASup parte do pressuposto que qualquer fonte de água superficial ou qualquer mudança nas propriedades destas são passíveis de ser relatadas e, conseqüentemente, o componente de águas subterrâneas pode ser identificado e quantificado.

Medições de vazão em diferentes seções ao longo de um curso d'água permite a determinação da troca ASub-ASup através do cálculo da diferença entre as vazões medidas, partindo do pressuposto que o aumento na vazão é devido à descarga de águas subterrâneas e não resultante de um evento de chuva. Este método fornece um valor médio do fluxo ASub-ASup ao longo do comprimento onde foi aplicado, sendo, no entanto, insensível às heterogeneidades locais (KALBUS *et al.*, 2006).

Outra forma de estimar a contribuição de água subterrânea para cursos d'água superficiais é a separação dos diferentes componentes de um hidrograma (KALBUS *et al.*, 2006), assumindo que o escoamento de base representa a descarga de água subterrânea no curso d'água.

#### 2.1.4.4 Traçadores Artificiais e Ambientais

Corantes e outros traçadores podem ser adicionados à água com o intuito de prover informações qualitativas sobre o movimento da água subterrânea para corpos d'água superficiais. Corantes fluorescentes e traçadores radioativos que são facilmente detectados em pequenas concentrações e apresentam pequeno risco ambiental se tornaram uma ferramenta útil para traçar os caminhos do fluxo da água subterrânea, em particular em áreas cársticas.

Este método consiste em inventariar nascentes, poços tubulares, cacimbas e sumidouros, em seguida escolher pontos para a injeção de corantes ou outros traçadores, e monitorar potenciais áreas de descarga durante um período de tempo adequado para o aparecimento do traçador (ROSENBERRY; LABAUGH, 2008).

A razão de isótopos de hidrogênio de oxigênio presentes na água tem sido usada por décadas para distinguir suas origens, incluindo a descarga de água subterrânea nas águas superficiais. A vantagem deste método é que os isótopos são parte da água e não estão dissolvidos na água. O uso desta técnica é indicado, sobretudo quando as diferentes fontes de água envolvidas no estudo apresentam diferenças significativas no fracionamento isotópico. Se as diferentes fontes de água apresentam composição isotópica distinta, então modelos de mistura podem ser aplicados para quantificar as fontes de água.

Existem várias publicações sobre este tema, sendo o livro do Clark e Fritz (1997) um clássico bastante citado.

#### 2.1.4.5 Infiltrômetros

Medidas diretas do fluxo na interface ASub-ASup podem ser realizadas por meio de infiltrômetros, dispositivos que isolam uma pequena área do leito de um corpo d'água e medem o fluxo d'água através dessa área. Os infiltrômetros são usados em rios, lagos, wetlands e estuários para medir o fluxo entre ASub-ASup em condições naturais.

Existem vários modelos de infiltrômetros e as referências sobre esta técnica indicam que desde a década de 40 já se utilizavam infiltrômetros. Um dos modelos mais comuns e mais simples de infiltrômetros utiliza um tambor de aço ou plástico encravado no fundo do rio, ligado a um recipiente de plástico para registrar a mudança em volume de água ao longo do tempo (LEE, D. R., 1977 apud ROSENBERRY; LABAUGH, 2008).

#### 2.1.4.6 Modelamento Numérico

Os modelos numéricos hidrológicos e hidrogeológicos tiveram um avanço considerável a partir da década de 60, quando os computadores se tornaram velozes e com capacidade de memória suficiente para o tamanho dos sistemas de equações lineares envolvidos.

Inicialmente tanto os modelos hidrológicos quanto os modelos de águas subterrâneas foram utilizados de forma independentes, no entanto, desde que a interação entre ASub-ASup tornou-se alvo de estudo, vários modelos foram desenvolvidos para integrar tanto a porção superficial quanto a subterrânea do ciclo hidrológico.

É consenso entre os pesquisadores que os modelos numéricos representam a ferramenta mais poderosa no estudo de interação ASub-ASup, já que eles proporcionam uma visão holística dos dados e além disso é capaz de fazer previsões através da simulação de cenários futuros. A qualidade do modelo, no entanto, está intimamente relacionada à qualidade dos dados que serão inseridos, isso inclui: (1) séries de monitoramento pluviométrico, dos níveis d'água subterrânea, vazões de cursos d'água, evaporação, etc.; (2) dados topográficos; (3) dados geológicos; (4) dados hidrogeológicos; (5) parâmetros hidráulicos.

Muitos autores sugerem que o mais apropriado é usar outras técnicas de estudo de interação ASub-ASup para que combinado com o modelo matemático se obtenha a melhor resposta acerca das questões estudadas.

A bibliografia sobre as técnicas de estudo entre águas ASub-ASup é bastante ampla. Informações mais detalhadas podem ser obtidas nos trabalhos de (KALBUS; REINSTORF; SCHIRMER, 2006), (ROSENBERRY; LABAUGH, 2008) e (GONZÁLEZ-PINZÓN *et al.*, 2015). No tópico a seguir será abordado de forma mais particularizada os modelos existentes e suas aplicações, e o que motivou à escolha do modelo MIKE SHE para a execução deste trabalho.

## 2.2 MODELAMENTO NUMÉRICO DE INTERAÇÃO ASUB-ASUP

O modelamento numérico integrado tem-se mostrado a técnica mais completa e que fornece melhores resultados nos estudos de interação ASub-ASup. Deve-se a este fato o crescente desenvolvimento de modelos integrados nas últimas décadas o que tem levado pesquisadores e profissionais da área de gerenciamento de recursos hídricos a escreverem trabalhos que comparam os diversos modelos existentes e recomendam as suas aplicações mais comuns (Rassam e Werner, 2008; CMD, 2001; Levy e Xu, 2012; Tian *et al.*, 2015; Refsgaard *et al.*, 2010; Barthel e Banzhaf, 2015; Akram *et al.*, 2012).

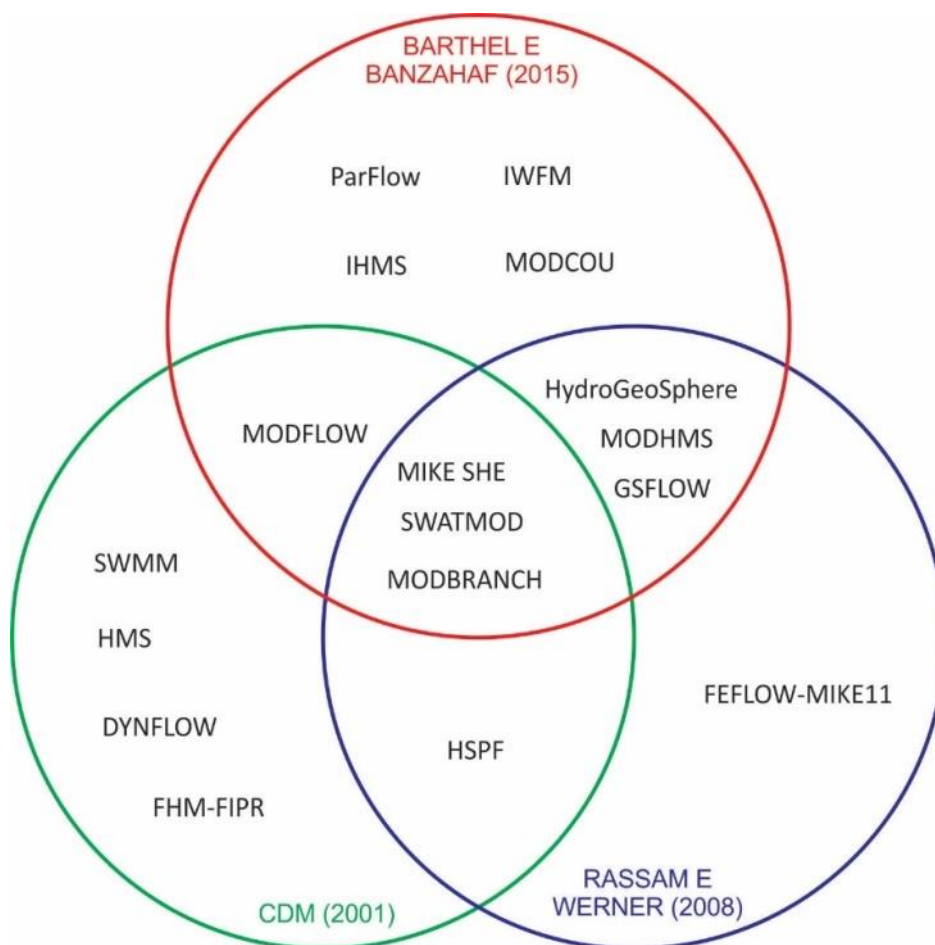
Alguns autores compararam dois ou mais modelos em uma área específica, e outros buscaram identificar os modelos existentes selecionando os mais relevantes com base em critérios que eles estabeleceram, que englobam: número de usuários; custo; facilidade de uso; Integração com SIG; serviços de suporte; limitações do modelo; capacidade de expandir-se; experiência requerida; processos simulados e escalas temporais e espaciais. Desta forma, foram identificados 17 modelos de interação ASub-ASup como mais importantes, que incluem: **MIKE SHE** (GRAHAM; BUTTS, 2005); **GSFLOW** (MARKSTROM *et al.*, 2008); **HydroGeoSphere** (BRUNNER; SIMMONS, 2012), (THERRIEN *et al.*, 2010); **ParFlow** (VANDERKWAAK; LOAGUE, 2001); **MODHMS** (PANDAY; HUYAKORN, 2004); **SWATMOD** (SOPHOCLEUOUS *et al.*, 1999); **IWFM** (CALIFORNIA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES, 2013); **IHMS** (RAGAB; BROMLEY, 2010), (RAGAB *et al.*, 2010); **MODCOU** (PRYET *et al.*, 2014); **MODFLOW** (PRUDIC; KONIKOW; BANTA, 2004); **MODBRACH** (SWAIN; WEXLER, 1996); **SWMM** (HUBER; DICKINSON, 1988); **HMS** (YU *et al.*, 1999); **DYNFLOW** (CDM, 2001); **FHM-FIPR** (ROSS *et al.*, 1997); (SDI, 1997); **HSPF** (DONIGIAN; BICKNELL JR., 1995); **FEFLOW-MIKE11** (MONNINKHOFF, 2002), (YAMAGATA *et al.*, 2012).

A Figura 4 mostra a distribuição dos 17 modelos de integração ASub-ASup identificados como mais importantes, sendo que as áreas de intersecção dos círculos são indicativas de um consenso dos autores quanto à relevância das ferramentas de modelagem que lá se encontram agrupadas.

O conjunto inicial dos modelos de interação ASub-ASup é relativamente grande e gera dúvidas na seleção da ferramenta para um estudo específico. Os autores indicam que o primeiro passo para a escolha do modelo é entender os processos locais (área de estudo) do ciclo hidrológico envolvidos no intercâmbio ASub-ASup e interpretar como eles interagem entre si, a partir de então se deve levar em conta a capacidade que as ferramentas de modelagem proporcionam para adaptar estes processos nas escalas temporais e espaciais requeridas.

A escala temporal diz respeito ao fato de que os processos associados às águas superficiais são comumente mais rápidos que os relacionados às águas subterrâneas, por exemplo, a precipitação e a vazão de cursos d'água têm tempo de residência bem inferior ao fluxo d'água subterrânea em um aquífero.

Figura 4 - Principais modelos de interação ASub-ASup.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escala espacial está associada às dimensões da área que será modelada, isto é, se o interesse da pesquisa está relacionado a toda bacia hidrográfica, a várias bacias hidrográficas, somente ao entorno do rio, ou apenas a uma fração do rio, entre outros casos. É a escala espacial que ditará, inicialmente, a complexidade da ferramenta de modelagem que será escolhida. Os modelos de escalas regionais normalmente adotam uma abordagem mais simples, que requerem menos parâmetros que os modelos de pequena escala, embora este último simule mais processos. O termo escala regional é aplicado para bacias hidrográficas com dimensões entre  $10^3$  a  $10^5$  km<sup>2</sup> (BARTHEL & BANZHAF, 2016).

A geologia da área estudada também tem uma influência significativa na escolha da ferramenta de modelagem. Modelar aquíferos fraturados, por exemplo, requer modelos de dupla porosidade. Já os meios heterogêneos, com camadas que apresentam diferentes parâmetros hidráulicos, exigem modelos que possam lidar com estas características. Outro caso são áreas que precisam de um bom mecanismo de modelagem para manipulação de evapotranspiração, como aquelas onde há grandes lagos, pântanos ou cobertura vegetal densa.

Uma vez que os processos, as escalas temporais e espaciais e a geologia da área sejam reconhecidos é importante somar a essas questões a disponibilidade dos dados (parâmetros hidráulicos, dados de monitoramento hidrometeorológicos, etc.) na escolha da ferramenta de modelagem. Os dados requeridos estão relacionados com a complexidade do modelo e a escala espacial na qual o modelo opera. Os modelos menos complexos geralmente têm menos requisitos de dados, no entanto, a simplificação exigida para a aplicação dessas ferramentas pode levar a erros inaceitáveis (KAISER *et al.*, 2000).

Uma questão menos técnica, porém não menos importante, é a disponibilidade da ferramenta de modelagem. Alguns softwares de modelamento integrado são gratuitos outros não, então é preciso levar em consideração que, se a ferramenta mais adequada ao estudo não for gratuita e se não houver meios de obtê-la, não será possível trabalhar com ela e outro software deverá ser selecionado.

Além das questões citadas acima, Barthel e Banzhaf (2015) comparam os modelos integrados de acordo com o acoplamento dos processos relacionados à zona saturada, zona não saturada e águas superficiais. Os autores distinguem os modelos totalmente integrados e os modelos acoplados. Os modelos totalmente

integrados são muito semelhantes quando se comparam as suas funcionalidades e características, enquanto os sistemas acoplados diferem no que diz respeito a uma enorme gama de aspectos.

Nos modelos totalmente integrados, as equações que governam os fluxos superficiais e subterrâneos são resolvidas simultaneamente, utilizando um único software. Segundo Barthel e Banzhaf (2015) os softwares desta categoria mais mencionados na literatura incluem o ParFlow, HydroGeoSphere, InHM (VANDERKWAAK, 1999) e OpenGeoSys (KOLDITZ *et al.*, 2012).

Quando dois ou mais modelos individuais são vinculados, ou seja, os dados de saída de um modelo geram dados de entrada para outro modelo, denomina-se a ferramenta final de modelagem como um modelo acoplado. Neste grupo ainda é possível distinguir os modelos cujos pacotes de águas subterrâneas e superficiais estão inseridos numa mesma estrutura no software; e os modelos desenvolvidos individualmente, em diferentes softwares. Comumente estes últimos incorporaram o MODFLOW, que é um clássico simulador de águas subterrâneas, ao módulo subsuperficial, são exemplos, o GSFLOW que integra o modelo PRMS (*Precipitations-Runoff Modeling System*) com MODFLOW; O SWATMOD representa a integração do modelo hidrológico SWAT com MODFLOW; e o MODHMS introduz uma rotina em duas dimensões para águas superficiais no MODFLOW.

Verifica-se um aumento acentuado nas publicações relacionadas aos modelos totalmente integrados desde 2005, principalmente em escalas menores e em locais específicos de teste, sendo que estudos em escala regional foram publicados sobretudo depois de 2010 (BARTHEL & BANZHAF, 2016). As aplicações dos sistemas totalmente integrados de interação ASub-ASup são bastante amplas, eles fornecem resposta para quase qualquer pergunta que se possa ter sobre recursos hídricos, no entanto, nota-se ainda que está muito restrita a pesquisas académicas. Isso pode ser resultado do custo computacional elevado, o que vem se modificando ao longo dos anos.

Barthel e Banzhaf (2015) apontam ainda que os modelos MIKE SHE e, mais recentemente, o modelo FEFLOW acoplado com MIKE11 são mais utilizados para estudos práticos de gestão do que por mero interesse científico, um aspecto notável quando se trata de impulsionar caminhos futuros para pesquisa hidrológica integrada.

De acordo com a pesquisa bibliográfica sobre as ferramentas de modelagem integrada existentes é possível concluir que os modelos mais completos e mais bem avaliados são o HydroGeoSphere, o MIKE SHE, o GSFLOW e o SWATMOD.

Neste trabalho, optou-se por utilizar o MIKE SHE que é um software de modelamento utilizado em muitos centros de pesquisa e projetos de consultoria ao redor do mundo (REFSGAARD & STORM, 1995), inclusive no Brasil (LUCAS, 2007; GÓES, 2009), e que tem uma ampla gama de aplicações. Outro fator a ser ressaltado no uso do modelo MIKE SHE refere-se à sua interface amigável para entrada de dados, calibração dos parâmetros e visualização dos resultados (GÓES, 2009).

### **2.3 MIKE SHE**

O modelo MIKE SHE começou a ser desenvolvido em 1977 com a criação do código SHE – *Système Hydrologique Européen* como resultado da parceria de três organizações europeias: Instituto Hidráulico Dinamarquês, Instituto Inglês de Hidrologia e a consultoria francesa SOGREAH (HUGHES; LIU, 2008). O Instituto Hidráulico Dinamarquês (agora chamado *DHI Water and Environment*) assumiu a liderança das melhorias e adições ao código SHE e desenvolveu a sua versão comercial – MIKE SHE (DHI, 2007).

Basicamente, o que um modelo numérico faz é: (1) montar as equações de acordo com o domínio discretizado; (2) incluir as condições iniciais e de contorno; (3) montar a matriz e vetores do sistema de equações lineares; (4) resolver o sistema de equações. Para isso, o usuário deve fornecer, entre outras coisas: (a) o esquema de discretização do domínio; (b) as condições iniciais e de contorno; (c) os parâmetros do problema; e (d) algumas vezes, o tipo do algoritmo para solução dos sistemas de equações ou alguns parâmetros.



### 2.3.1 Características Principais

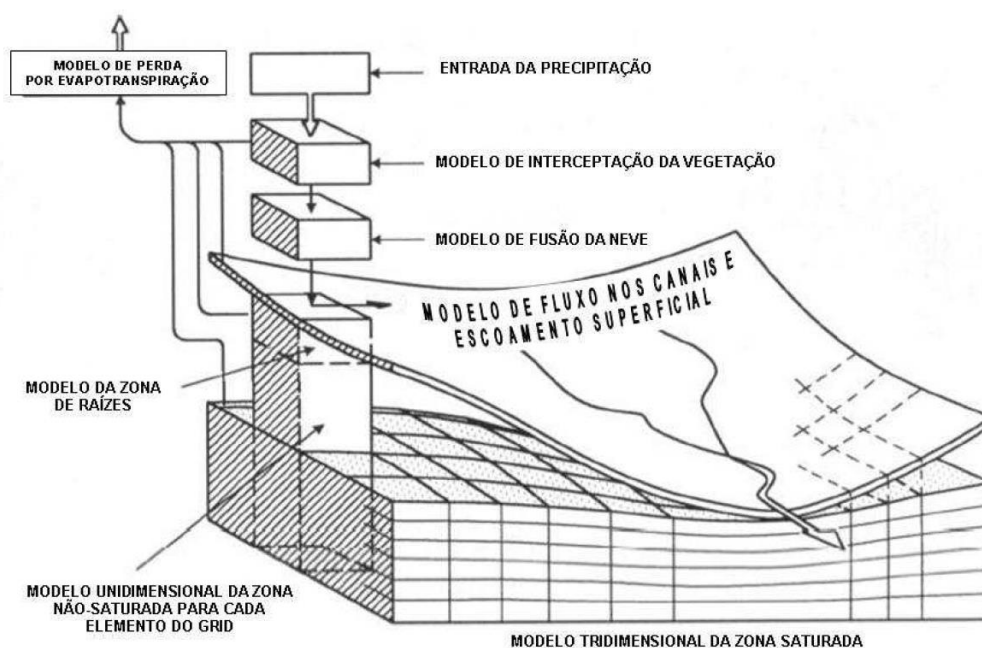
O MIKE SHE é um modelo integrado de base física e distribuído, capaz de simular eventos e processos contínuos. Quando se diz que um modelo apresenta base física refere-se a sua capacidade de integrar características físicas do terreno, como superfície topográfica e outros atributos da bacia hidrográfica como vegetação, solo e parâmetros climáticos. Já quando se fala que o modelo é distribuído quer dizer que é possível variar temporalmente e espacialmente conjuntos de parâmetros tais como: perfis de solo, condições de uso do terreno, práticas de drenagem, dados climáticos de evapotranspiração e valores de escoamento superficial (FRANA, 2012).

A distribuição espacial das características da bacia hidrográfica/hidrogeológica se dá através de um grid ortogonal que permite a discretização horizontal e vertical. A distribuição temporal permite que os usuários tanto variem os períodos de simulação quanto definam valores constantes para os parâmetros durante a simulação.

O modelo MIKE SHE é aplicado tanto para escalas locais quanto regionais (menos de 1 km<sup>2</sup> - milhares de km<sup>2</sup>), e ainda simula transporte de partículas e solutos, além de poder ser acoplado ao MIKE 11 para simular as relações Rio-Aquífero.

Outra característica interessante do MIKE SHE é que o usuário pode definir a complexidade do modelo, ajustando a configuração modular na interface gráfica do utilizador. A estrutura modular apresenta os seguintes componentes: (1) evapotranspiração; (2) fluxo na zona não saturada; (3) fluxo na zona saturada; (4) fluxo superficial; e (5) fluxo nos canais (Figura 5).

Figura 5 - Representação esquemática da estrutura modular do MIKE SHE mostrando os componentes do modelo.



Fonte: GÓES, 2009

A seguir verifica-se uma breve descrição dos módulos do MIKE SHE.

### 2.3.1.1 Evapotranspiração

O módulo evapotranspiração do MIKE SHE refere-se à fração da precipitação que evapora ou é transpirada pelas plantas.

O MIKE SHE possui duas formas para o cálculo da evapotranspiração real: o método de *Kristensen e Jensen*, que será abordado a seguir, e outro método simples de balanço hídrico em duas camadas que é aplicado principalmente em áreas onde o nível da água subterrânea é pouco profundo, como em áreas úmidas, onde a taxa de evapotranspiração real é próxima da taxa potencial. Este não é o caso da área de estudo, e portanto este segundo método não será discutido neste trabalho. Informações detalhadas podem ser encontradas no manual do software (DHI, 2007).

- **Método de Kristensen e Jensen**

Neste método, a evapotranspiração real e a umidade real do solo são calculadas a partir da razão da evaporação potencial, com a profundidade máxima das raízes e o índice de área foliar para as plantas. O cálculo da evapotranspiração através do método de Kristensen e Jensen requer dados de entrada baseados em medições de campo, como evapotranspiração potencial ( $ET_{ref}$ ) (mm), profundidade máxima das raízes (AROOT) (m) e índice de área foliar das plantas (IAF) (adimensional).

O primeiro passo é determinar a capacidade máxima de armazenamento da interceptação ( $I_{max}$ ) (mm), que é função do tipo/desenvolvimento da vegetação (Equação 2). O processo de interceptação é definido como a retenção da precipitação nas folhas, ramos e troncos da vegetação. Essa água interceptada evapora diretamente sem adicionar umidade ao solo.

$$I_{max} = C_{int} \cdot IAF \quad \text{EQUAÇÃO 2}$$

onde  $C_{int}$  (mm) é o coeficiente de interceptação.

Se uma quantidade de água suficiente for interceptada pode ocorrer a evaporação a partir da vegetação, sendo este processo dado pela Equação 3:

$$E_{veg} = \min(I_{max}, E_p \Delta t) \quad \text{EQUAÇÃO 3}$$

onde  $E_{veg}$  é a evaporação a partir da vegetação (mm),  $E_p$  é a taxa de evapotranspiração potencial (mm/t) e  $\Delta t$  é o período de tempo (*time step*) para a simulação.

A transpiração da vegetação ( $E_{tr}$ ) (mm) depende do IAF, do teor de umidade do solo na zona de raízes e a densidade das raízes (EQUAÇÃO 4).

$$E_{tr} = f_1(IAF) \cdot f_2(\theta) \cdot FDR \cdot E_p \quad \text{EQUAÇÃO 4}$$

onde  $E_{tr}$  é a transpiração real (mm),  $f_1(IAF)$  é uma função baseada no índice de área foliar,  $f_2(\theta)$  é uma função baseada no teor de umidade do solo na zona de raízes e FDR é a função de distribuição das raízes.

O último componente necessário para calcular a interceptação e a evapotranspiração é a evaporação que ocorre no topo do perfil do solo ( $E_s$ ) (mm), dada pela Equação 5:

$$E_s = E_p \cdot f_3(\theta) + (E_p - E_{tr} - E_p \cdot f_3(\theta) \cdot f_4(\theta) \cdot (1 - f_1(IAF))) \quad \text{EQUAÇÃO 5}$$

onde  $E_p$  é a evapotranspiração potencial (mm) e  $E_{tr}$  é a transpiração real (mm).

### 2.3.1.2 Fluxo na Zona não Saturada

O fluxo na zona não saturada, no MIKE SHE, é unidimensional e assumido como sendo vertical através do perfil do solo. O modelo permite escolher um dos três métodos: (1) Equação de Richards; (2) fluxo gravitacional simplificado; e (3) um método simples de balanço hídrico em duas camadas.

A método da Equação de Richards é mais preciso e robusto que o método do fluxo gravitacional simplificado e mais apropriado para o perfil do solo encontrado na área de estudo que o método simples de balanço hídrico em duas camadas.

A equação de Richards é baseada na Lei de Darcy (Equação 1) e na equação da continuidade (Equação 6):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S(z) \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

onde  $\theta$  é o teor de umidade volumétrico do solo ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $q$  é a vazão ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) (Lei de Darcy),  $z$  (m) é o componente gravitacional da carga hidráulica e  $S$  é o termo que representa a perda de água por extração pelas raízes ( $\text{m}^{-1}$ ).

Combinando a equação da continuidade com a lei de Darcy tem-se a Equação de Richards (Equação 7):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(z) \quad \text{EQUAÇÃO 7}$$

O termo de perda (S) é calculado a partir da extração de água pelas raízes para a transpiração na parte superior da zona não-saturada. A integral da extração de água pelas raízes acima de toda a profundidade da zona de raízes é igual à evapotranspiração real. O MIKE SHE utiliza o método das diferenças finitas para solucionar essa equação.

### 2.3.1.3 Fluxo na Zona Saturada

O Módulo da Zona Saturada (*Saturated Flow*) do MIKE SHE calcula o fluxo tridimensional d'água subterrânea para aquíferos heterogêneos confinados ou inconfiados.

As variações temporais e espaciais da carga hidráulica são descritas matematicamente pela combinação da equação tridimensional de Darcy e do princípio de conservação de massa (Equação 8). A solução numérica se dá pelo método das diferenças finitas através do esquema iterativo implícito.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{EQUAÇÃO 8}$$

Onde  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  são as condutividades hidráulicas ao longo dos eixos x, y e z do modelo (m/s), h é a carga hidráulica (m), Q representa as entradas e saídas de água (m<sup>3</sup>/s) e S é o armazenamento (m<sup>-1</sup>).

O MIKE SHE oferece a escolha entre dois *solvers*, o SOR, baseado no método de sobre-relaxação sucessiva, e PCG, fundamentado na técnica do gradiente conjugado pré-condicionado.

O componente Zona Saturada Interage com os outros componentes do MIKE SHE usando as condições de contorno explicitamente ou implicitamente.

### 2.3.1.4 Fluxo Superficial

Quando a taxa de precipitação pluviométrica excede a capacidade de infiltração do solo, a água se torna disponível para o escoamento superficial, sendo encaminhada na direção dos cursos d'água. A rota exata e a quantidade são determinadas pela topografia e resistência de fluxo, bem como pela evaporação e infiltração ao longo do trajeto do escoamento.

O fluxo d'água na superfície do terreno é calculado pelo módulo fluxo superficial (*overland flow*) do MIKE SHE, usando as equações de Saint-Venant. Como é numericamente difícil resolver essas equações, as equações de Saint-Venant são simplificadas usando uma aproximação de onda difusiva. Usando a Descrição de Manning para o atrito do declive, as equações que governam o fluxo superficial podem ser expressas como:

$$uh = M \left( -\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad \text{EQUAÇÃO 9}$$

$$vh = M \left( -\frac{\partial z}{\partial y} \right)^{1/2} h^{5/3} \quad \text{EQUAÇÃO 10}$$

Onde  $u$  é a velocidade do fluxo na direção  $x$  (m/s),  $v$  é a velocidade do fluxo na direção  $y$  (m/s),  $h$  é a profundidade da água (m),  $M$  é o número de Manning ( $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ) e  $z$  é o nível d'água na superfície (m).

As equações 9 e 10 são resolvidas pelo método iterativo implícito das diferenças finitas, de forma similar ao método aplicado ao fluxo na zona saturada.

### 2.3.1.5 Fluxo nos Canais

Este módulo está associado a possibilidade de acoplamento do modelo hidrológico/hidrodinâmico MIKE 11 com o MIKE SHE.

Basicamente, para a simulação no MIKE 11, os seguintes componentes precisam ser definidos no modelo hidrodinâmico:

- geometria da rede de rios;
- seções transversais;
- condições de contorno;
- parâmetros hidrodinâmicos;
- arquivo de simulação gerenciador.

Outra alternativa é simular o fluxo em duas dimensões, o qual neste caso seria substancialmente mais lento que utilizando o MIKE 11, e além disso, não permite a inserção de estruturas como vertedouros, pontes, etc.

### **2.3.2 Aplicações do MIKE SHE**

As principais publicações (mais recentes) relativas à descrição do MIKE SHE refere-se ao capítulo do livro *Watershed Models* (GRAHAM, BUTTS, 2005), ao manual do usuário do software (DHI, 2007) e à avaliação do modelo executada por Hughes e Liu (2008). Diversas publicações mostram ainda aplicações do modelo para solução de diversas questões relacionadas à interação ASub-ASup (PAPARRIZOS; MARIS, 2015); (VOECKLER; ALLEN; ALILA, 2014); (DOUMMAR; SAUTER; GEYER, 2012).

O MIKE SHE é amplamente aplicado em muitos centros de pesquisa e projetos de consultoria ao redor do mundo, tais como: manejo e planejamento de bacias hidrográficas; desenho, gestão e otimização de abastecimento de água; manejo de problemas de irrigação e drenagem; impacto na água superficial pela extração de água subterrânea; uso conjunto de água superficial e subterrânea; cartografia da vulnerabilidade de aquíferos; contaminação produzida por rejeitos; remediação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas; estudos de inundações; impactos do uso do solo e mudanças climáticas; impactos da agricultura (irrigação, drenagens, nutrientes e pesticidas) (REFSGAARD, STORM, 1995). No Brasil destacam-se os trabalhos que avaliam o impacto da irrigação na bacia do

Ribeirão dos Marins (LUCAS, 2007) e a modelagem hidrológico-hidrodinâmica em áreas urbanas – Bacia do Rio Beberibe (GÓES, 2009).

Os estudos mostraram que o MIKE SHE é capaz de modelar várias condições hidrológicas extremas como irrigação, regiões montanhosas, wetlands, regiões costeiras, formações cársticas, climas frios, drenagem na agricultura em escala pontual e de campo.

Sendo assim, analisando os modelos hidrológicos distribuídos, optou-se, neste estudo, por trabalhar com o modelo MIKE SHE, por meio de concessão de uma licença acadêmica, considerando que sua estrutura permite a interação dinâmica entre os principais processos hidrológicos (fluxo superficial, fluxo na zona não-saturada e o fluxo na zona saturada). Vale também ressaltar a sua flexibilidade na definição de dados de entrada e parâmetros e sua capacidade de interface com os Sistemas de Informações Geográficas (SIG).



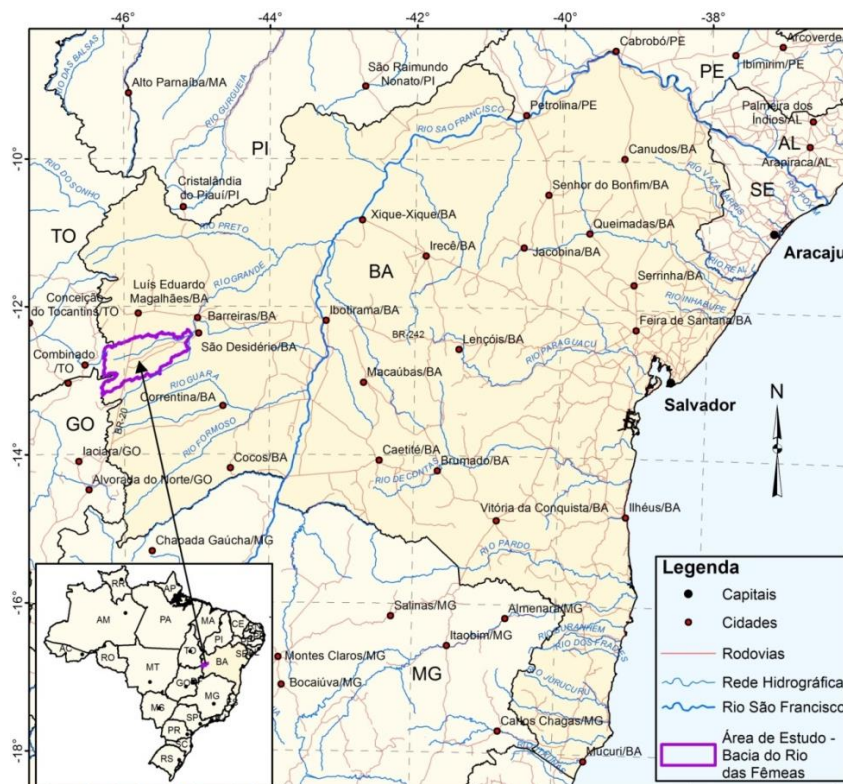
### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo trata da compilação, síntese, análise e interpretação dos dados sobre as características da área de estudo, isto é, clima, geomorfologia, solos, uso e ocupação da terra, geologia e hidrogeologia.

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo refere-se à bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas, um importante tributário do Rio Grande, que por sua vez é um afluente da margem esquerda do Rio São Francisco. A Bacia do Rio das Fêmeas se estende por uma área de aproximadamente 6411 km<sup>2</sup>, está situada no oeste do estado da Bahia, mais especificamente no município de São Desidério (Figura 6).

Figura 6 - Mapa de Localização da Área de Estudo.

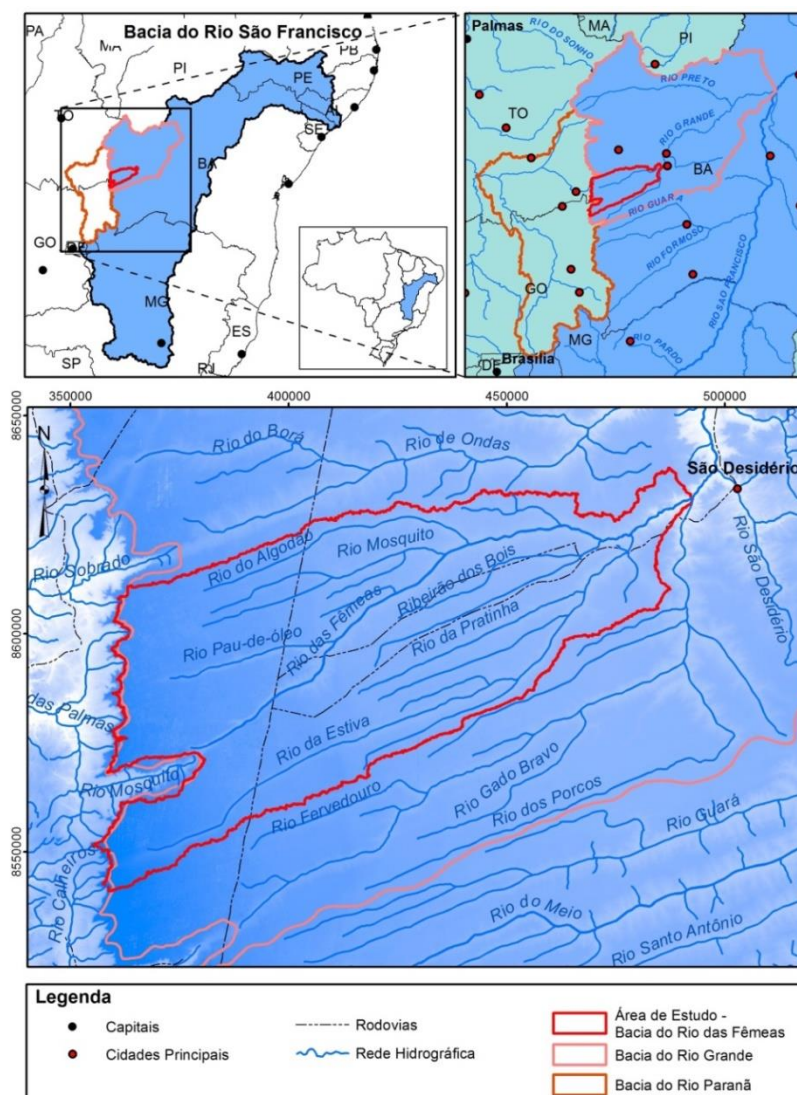


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2 HIDROGRAFIA

A Figura 7 ilustra o contexto hidrográfico no qual se encontra a Bacia do Rio das Fêmeas. Verifica-se que os cursos d'água tem direção SW-NE. A Bacia do Rio das Fêmeas faz fronteira, no sul, com a Bacia do Rio Fervedouro, no norte, com a Bacia do Rio de Ondas, ambos afluentes do Rio Grande, e no leste diretamente com o Rio Grande. No oeste a Bacia do Rio das fêmeas limita-se com a Bacia do Rio Paranã, afluente do Rio Tocantins.

Figura 7 - Hidrografia da Bacia do Rio das Fêmeas e entorno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As cotas das nascentes da sub-bacia do Rio das Fêmeas estão em torno de 1000 metros acima do nível do mar e a foz em torno de 650 metros (PIMENTEL *et al.*, 2000 apud ALBUQUERQUE, A. C. L. S, 2011).

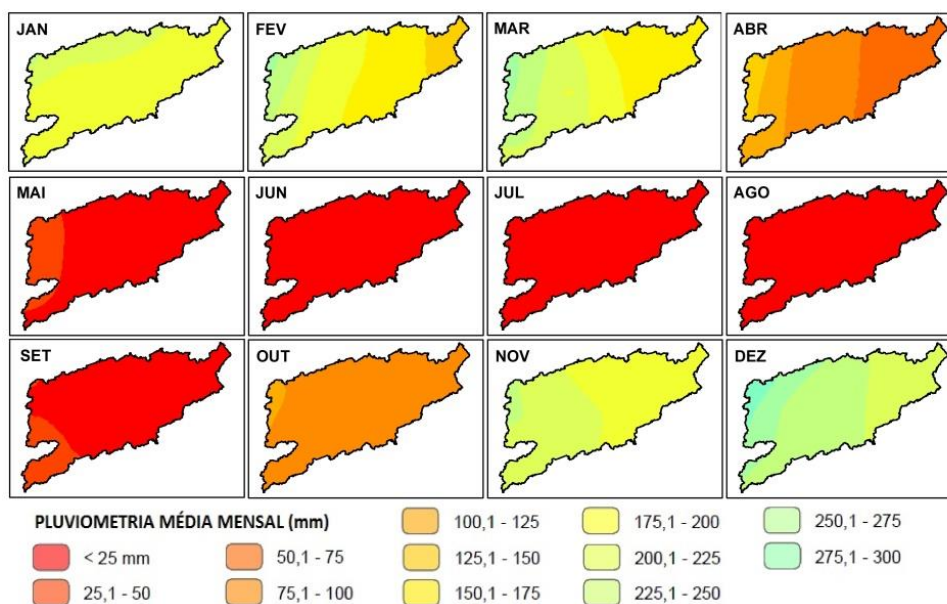
### 3.3 CLIMA

As características climáticas foram compiladas do mapa de clima do Brasil (IBGE, 2002) e os dados de umidade relativa do ar, temperatura e evaporação são referentes ao trabalho de Nascimento (2003).

Na Bacia do Rio das Fêmeas verifica-se o clima tropical quente semiúmido com temperatura média superior à 18°C em todos os meses do ano. A precipitação anual varia de 900 e 1.200 mm e a temperatura média anual é de 23,2 °C. A umidade relativa do ar apresenta média mensal variando de 45% a 79%. A taxa anual de evaporação é de aproximadamente 1.580 mm. O período chuvoso ocorre de outubro a abril, sendo os demais meses bastante secos. Nos meses úmidos precipita, em média, quase a totalidade anual (94%), sendo que o rio se mantém perene na estação seca, devido apenas ao fluxo de base do SAU (NASCIMENTO, 2003).

Na Figura 8, verificam-se as isoietas médias mensais na Bacia do Rio das Fêmeas compiladas do atlas pluviométrico do Brasil (CPRM, 2007), o qual indica que os meses mais chuvosos são de novembro a março, e os meses mais secos vão de maio a setembro.

Figura 8 - Pluviometria média mensal na Bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte: Modificado do Atlas pluviométrico do Brasil (CPRM, 2007).

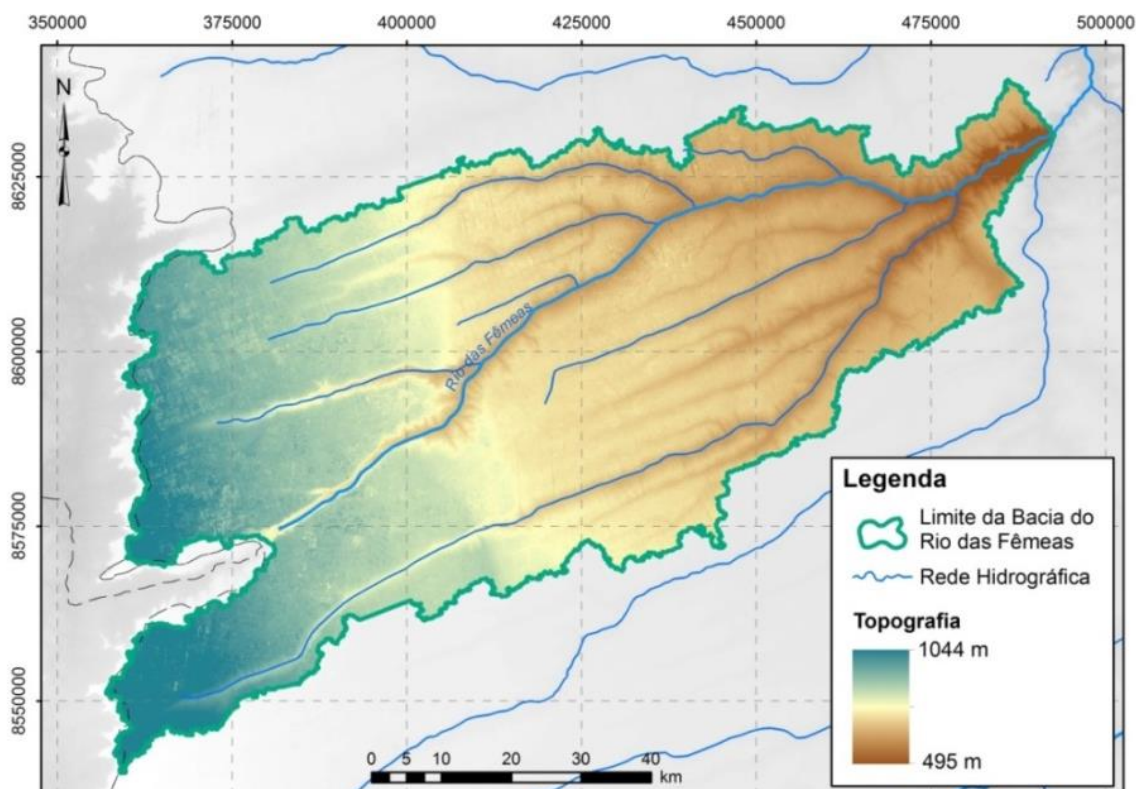
### 3.4 GEOMORFOLOGIA

Para a caracterização geomorfológica três trabalhos disponibilizaram dados bastante elucidativos. O primeiro corresponde à análise geomorfológica na escala 1:250.000 da área de abrangência dos aquíferos Urucuia e Areado (ANA, 2013a). Outro estudo, elaborado por Passo *et al.*, (2010), caracterizou na escala 1:50.000, a geomorfologia do município de São Desidério-BA. E por fim Souza *et al.*, (2015) estudou as características morfométricas e de susceptibilidade a enchentes da bacia do Rio das Fêmeas.

A superfície topográfica, com resolução de 30 metros, foi gerada a partir do modelo digital de elevação - MDE (ASTER Global DEM) disponível no endereço eletrônico <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>. As imagens foram adquiridas no dia 30 de janeiro de 2016.

Na bacia do Rio das Fêmeas as altitudes topográficas variam de 495 m a 1044 m, resultando na amplitude hipsométrica de 549 m. As altitudes aumentam de leste para oeste como mostra o mapa da Figura 9.

Figura 9 - Superfície topográfica da bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

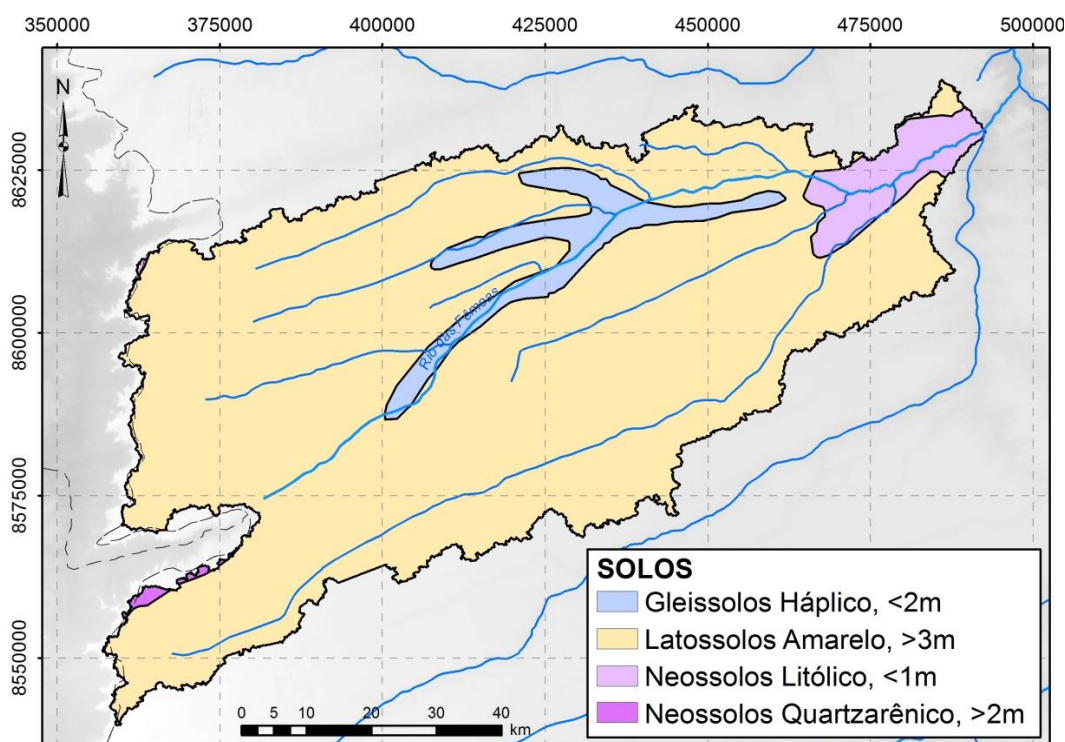
O relevo na área de estudo é bastante plano e apresenta descontinuidades como escarpas e ressaltos. A unidade geomorfológica predominante corresponde ao Chapadão Ocidental Baiano, também conhecida como Chapada do São Francisco. Nesta unidade a Serra Geral de Goiás se destaca como principal feição de relevo (ANA, 2013a).

As maiores cotas altimétricas são relativas às áreas de nascentes, as quais variam de 920 a 1044 m, enquanto as menores cotas (495 - 677 m) encontram-se nas áreas próximas à desembocadura do Rio das Fêmeas no Rio Grande. Essa variação nos valores de altitude podem influenciar na distribuição da precipitação e na intensidade de escoamento da bacia (SOUZA *et al.* 2015).

### 3.5 PEDOLOGIA

O tipo de solo predominante da área da bacia do Rio das Fêmeas é o Latossolos, com coloração variando de vermelho a amarelo. Comumente esse tipo de solo é profundo e bem drenado a maior parte do ano (ANA, 2013a). Na Figura 10 observa-se o mapa de solos da área de estudo.

Figura 10 - Solos na Bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte: Modificado de ANA (2013a).

Além do Latossolos, verifica-se em menores proporções solos pedregosos e rasos (Neossolos Litólicos), geralmente de encostas, os arenosos (Neossolos Quartzarênicos) e o Gleissolos, que encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água. Os Gleissolos ocorrem nas proximidades dos cursos d'água.

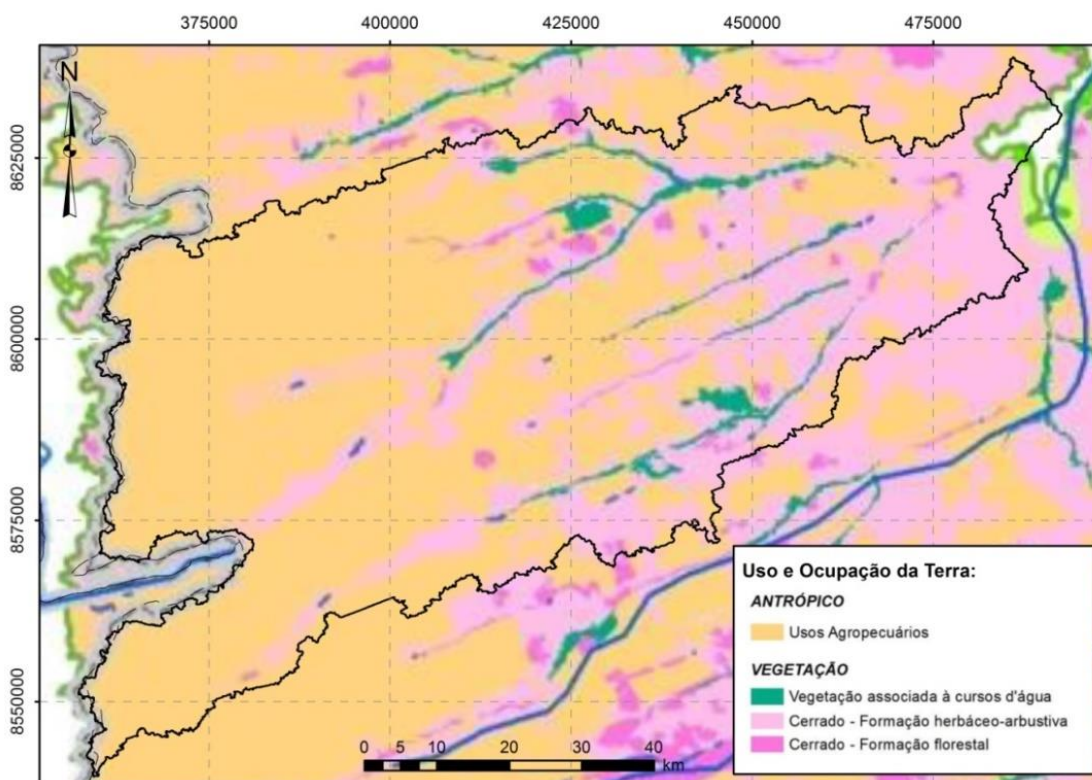
No Geral, os solos presentes na área de estudo são homogêneos, tendo como material de origem as rochas arenosas do Grupo Urucua. São solos, na

maioria, desenvolvidos numa área de relevo plano, na principal área de recarga do SAU (GASPAR, 2006).

### 3.6 USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL

A ANA (2013a) caracterizou, na escala 1:200.000, o uso e ocupação da terra na área dos Aquíferos Urucua e Areado. O mapa da Figura 11 mostra as classes de uso identificadas na bacia do Rio das Fêmeas.

Figura 11 - Uso e ocupação da terra na bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte: Modificado de ANA (2013a).

Verifica-se que grande parte da bacia teve a cobertura vegetal original suprimida em função da implantação de atividades agrícolas, com destaque para os cultivos de soja, algodão, milho e café.

A cobertura vegetal original é composta por cerrado, em maiores proporções o cerrado com formações arbustivas, e em porções isoladas o cerrado com formações florestais.

Nas margens dos cursos d'água verifica-se a vegetação do tipo matas ciliares e matas de galerias.

### **3.7 GEOLOGIA**

A bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas está inserida no contexto geológico da Bacia Sanfranciscana, que compreende as coberturas sedimentares fanerozóicas estabelecidas sobre o Cráton do São Francisco. De um modo geral, esta unidade tem sido objeto de estudos tectono-estratigráficos regionais, com destaque para os trabalhos de Campos & Dardene (1997a), Campos & Dardene (1997b), Sgarbi et al. (2001) e Spigolon & Alvarenga (2002). A sucinta descrição geológica da Bacia Sanfranciscana apresentada a seguir é baseada nestes autores.

#### **3.7.1 Bacia Sanfranciscana**

A Bacia Sanfranciscana se estende por uma área com aproximadamente 160.000 km<sup>2</sup>, distribuindo-se pelos estados da Bahia (53%) e Minas Gerais (29%), e em menores proporções no Tocantins (12%), Piauí (3%), Maranhão (2%) e Goiás (1%) (ANA, 2013a).

O formato da bacia é alongado, aproximadamente Norte-Sul, com comprimento superior a 1.000 km, e largura variável que pode atingir até mais de 200 km. Os limites da Bacia Sanfranciscana são, ao sul a Bacia do Paraná, ao norte a Bacia do Parnaíba, e os limites ocidental e oriental são respectivamente marcados pelas bordas externas das faixas Brasília e Araçuaí/Espinhaço Setentrional.

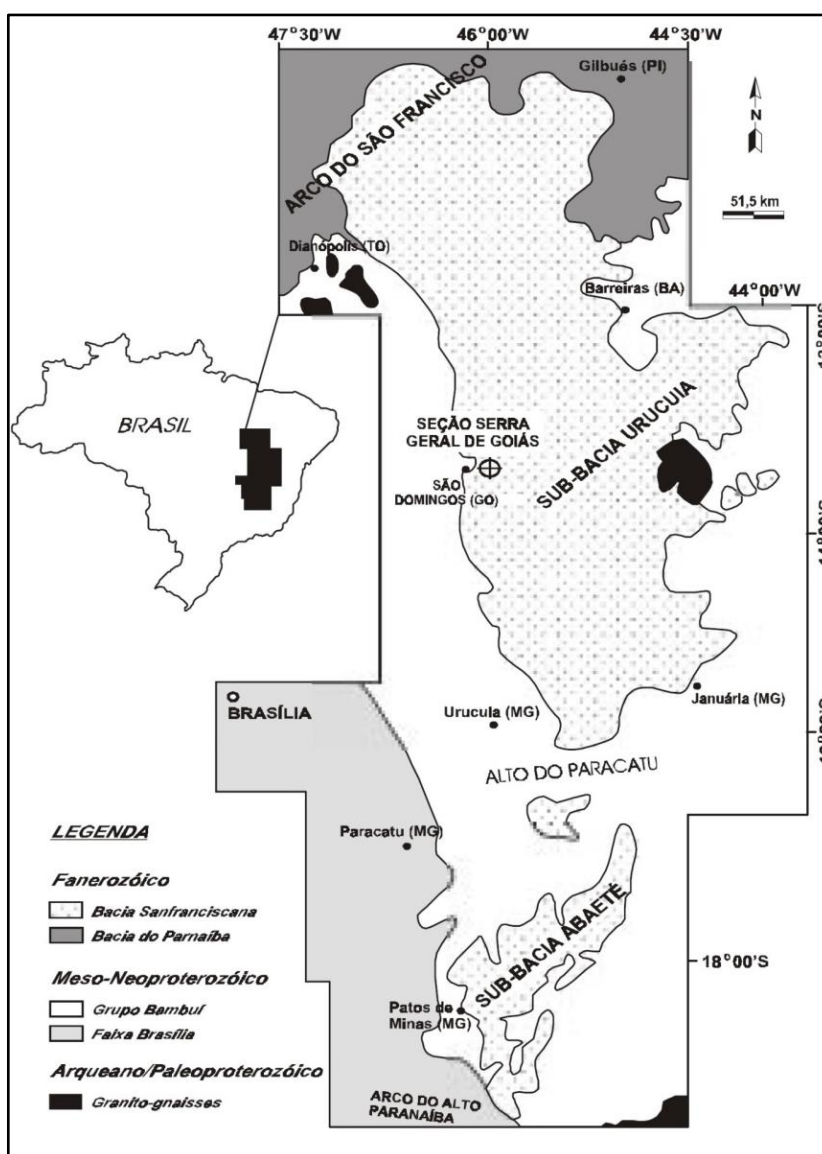
Quanto ao embasamento, a Bacia Sanfranciscana assenta-se, na porção norte, sobre as rochas da Bacia do Parnaíba (extremo sul dos estados do Piauí e Maranhão); na parte central, sobre o Grupo Bambuí; e na região de Correntina (BA)



e São Domingos (GO), sobre as rochas granito-gnáissicas e xistosas (arqueano). Na parte sul o embasamento é representado pelas sequências de metassedimentos do Alto Paranaíba (grupos Canastra e Araxá).

A Bacia Sanfranciscana está seccionada nas sub-bacias Abaeté, ao sul, e Urucuia, ao centro-norte, pelo Alto Estrutural do Paracatu, uma elevação regional do embasamento. Na Figura 12 observa-se o mapa do contexto geológico da Bacia Sanfranciscana, situação, embasamento e limites.

Figura 12 - Contexto Geológico da Bacia Sanfranciscana.



Fonte: Spigolon & Alvarenga, 2002.

A litoestratigrafia da Bacia Sanfranciscana foi tema de discussão durante um longo período, atualmente o modelo mais aceito é que a unidade basal da bacia corresponde ao Grupo Santa Fé, seguido do Grupo Areado, Grupo Mata da Corda, Grupo Urucuia e a Formação Chapadão, como mostra a coluna estratigráfica da Figura 13.

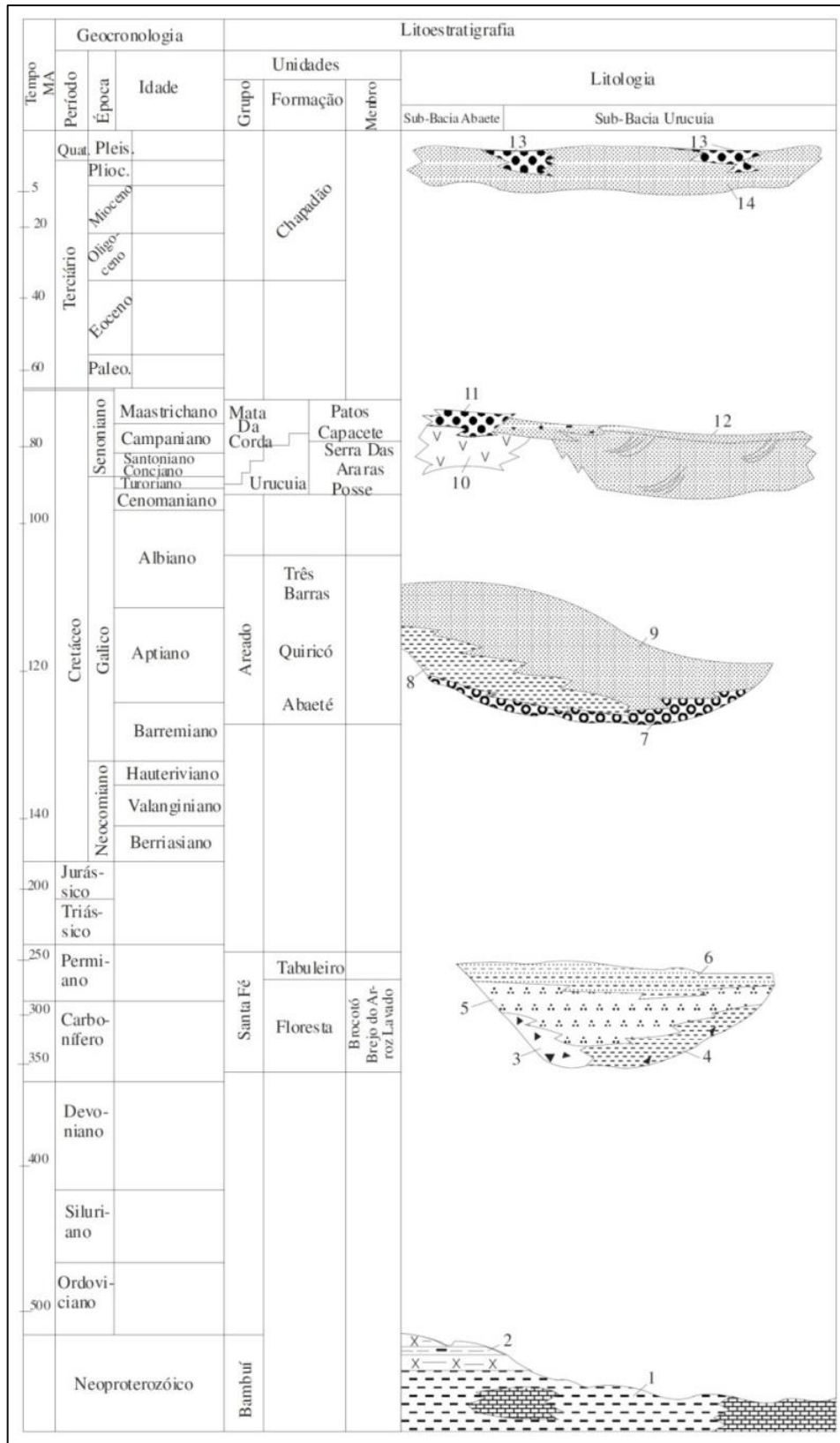
Nos tópicos a seguir serão abordados simplificada e os principais aspectos litológicos das unidades estratigráficas Grupo Urucuia e Formação Chapadão que são as que ocorrem na área da bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas.

#### 3.7.1.1 Grupo Urucuia

O Grupo Urucuia constitui uma unidade predominantemente arenosa e representa o quarto ciclo sedimentar da Bacia Sanfranciscana, sendo a unidade estratigráfica com mais amplo espalhamento geográfico, ocupando continuamente a maior parte da Sub-bacia Urucuia. O Grupo Urucuia pode ser dividido nas formações Posse e Serra das Araras.

A Formação Posse representa a porção basal da sedimentação Urucuia, constituindo o maior volume dos litotipos desse Grupo. Uma parte dela é predominantemente eólica, constituída por quartzo-arenitos muito finos a médios, com pouca matriz, bem selecionados, com boa maturidade textural e mineralógica. Sua porosidade é sempre elevada, com pouca matriz e argila infiltrada mecanicamente, no entanto, pode ocorrer cimentação por sílica, com massas de calcedônia ocupando a porosidade. Outra fácies da Formação Posse está relacionada a um sistema fluvial entrelaçado dominado por areias, sendo constituída por arenitos finos, claros a ocres, argilosos ou não, bem selecionados e menos maduros do que os anteriormente descritos. São arenitos feldspáticos e quartzo arenitos, com predomínio de quartzo microcristalino, além de epidoto, zircão, turmalina e opacos como acessórios. Cimentação por sílica ocorre de maneira mais restrita, em bancos horizontais.

Figura 13 - Coluna estratigráfica da Bacia Sanfranciscana.



Fonte: Gaspar, 2006.

A deposição da Formação Serra das Araras está relacionada ao aumento da taxa de umidade no âmbito do sistema desértico Urucuia. É caracterizada por depósitos de planícies aluviais, com contribuição eólica na forma de grãos de areia bem arredondados, originários do retrabalhamento da Formação Posse com predomínio de quartzo seguido subordinadamente por turmalina e zircão. É constituída por arenitos, argilitos e conglomerados vermelhos.

### 3.7.1.2 Formação Chapadão

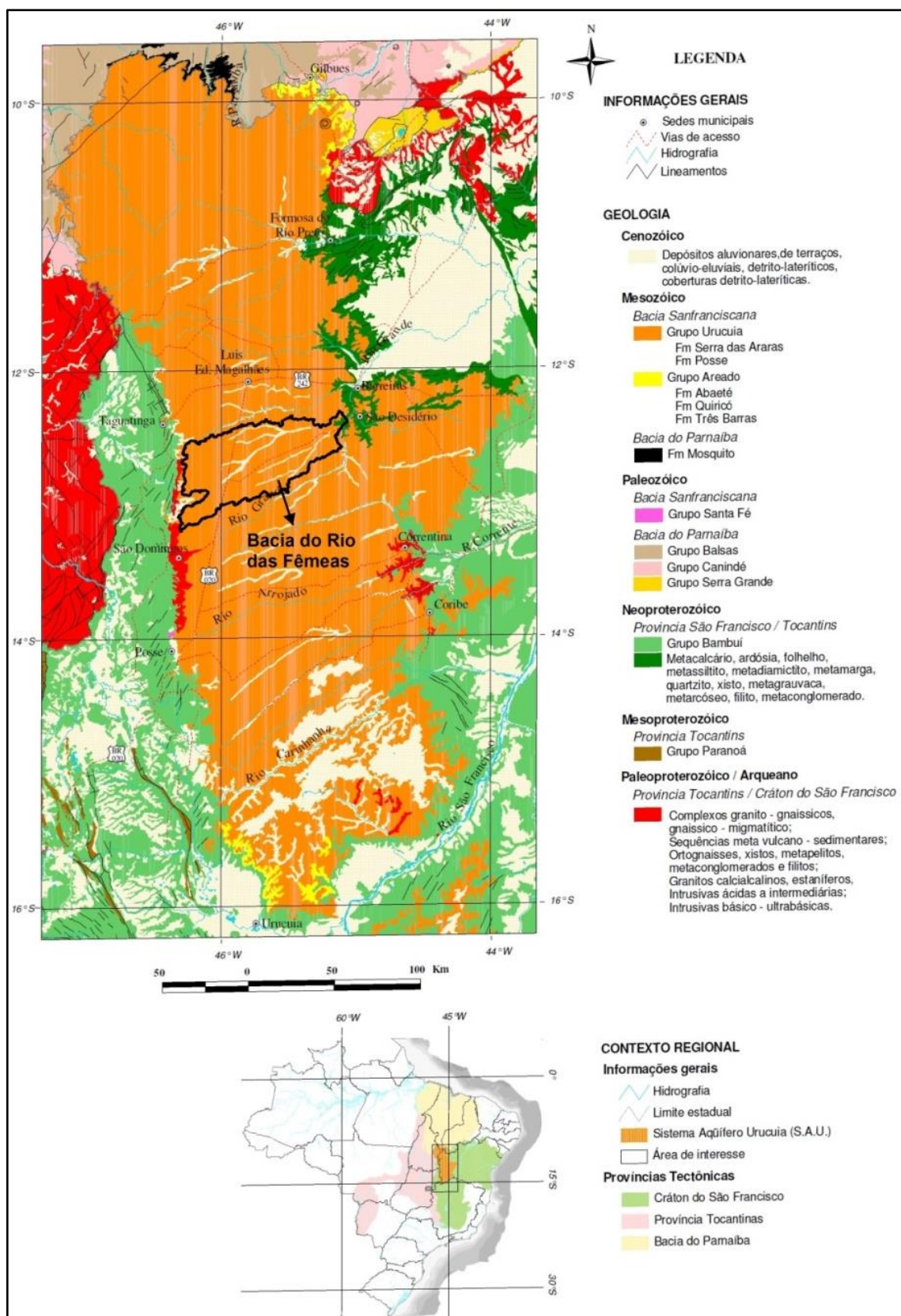
Esta unidade refere-se aos sedimentos arenosos cenozóicos que capeiam os planaltos e chapadas da Bacia Sanfranciscana. Sua ocorrência é descontínua e suas espessuras são pequenas.

Os sedimentos aluvionares desta unidade estão associados às planícies de inundação das maiores drenagens e resultam do retrabalhamento fluvial recente de materiais detríticos diversos. Compreendem cascalhos, areias e argilas/siltos dos canais de drenagem atuais e de terraços aluviais.

Os sedimentos coluvionares decorrem de pequenos retrabalhamentos das unidades fanerozóicas e pré-cambrianas, resultantes da regressão das formas de relevo tabular elevado, sendo formados por areias vermelhas ou esbranquiçadas.

As coberturas eluvionares da Formação Chapadão consistem de areias desenvolvida a partir dos arenitos, na porção ocidental da bacia, ou oriundas de rochas proterozóicas e fanerozóicas variadas. Na Figura 14, a seguir, tem-se o mapa geológico mais detalhada, restrito à sub-bacia Urucuia.

Figura 14 - Mapa Geológico simplificado da sub-bacia Urucuia.



Fonte: Gaspar, 2006.

### 3.7.2 Geologia Local

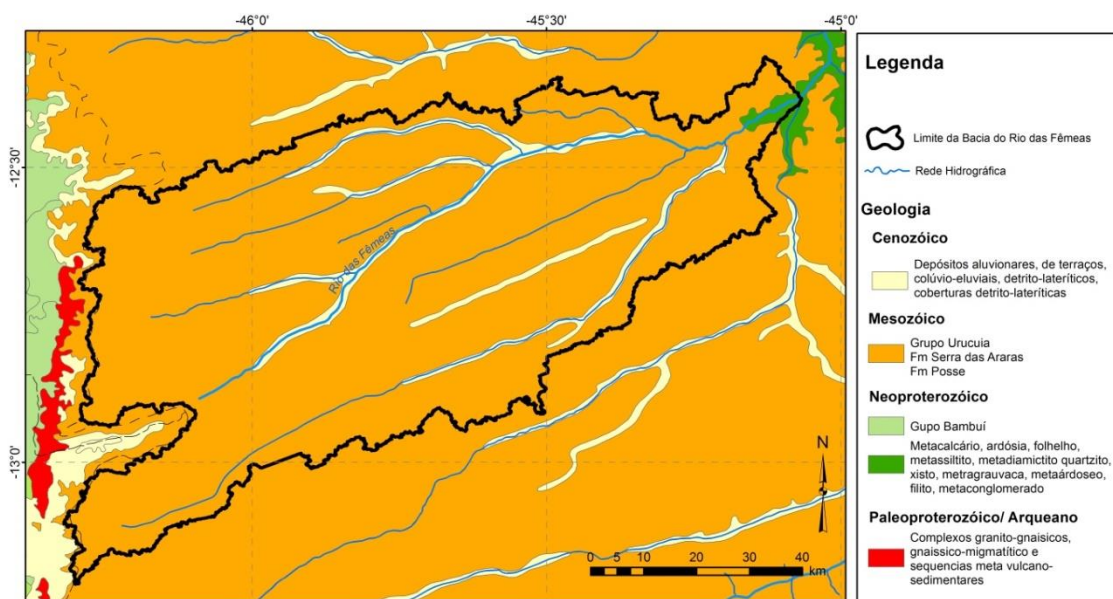
A geologia especificamente da área da Bacia do Rio das Fêmeas foi caracterizada por Nascimento (2003) e será descrita a seguir.

Na bacia do Rio das Fêmeas a geologia é bastante homogênea. Afloram sobretudo os arenitos do Grupo Urucuia. Secundariamente, notam-se calcários do Grupo Bambuí e sedimentos aluvionares do Quaternário (Figura 15).

Os afloramentos do Grupo Bambuí referem-se à Formação São Desidério, constituída por calcários cinza escuros. Nas proximidades da cidade de São Desidério estas litologias se apresentam dobradas, com vergência para NW.

Os sedimentos aluvionares distribuem-se preenchendo as calhas das principais drenagens e estendendo-se pelas planícies de inundação. Constituem-se essencialmente de areias, cascalhos, silte e argila, de coloração cinza escuro a cinza claro, resultantes do retrabalhamento fluvial recente de materiais detríticos diversos.

Figura 15 - Mapa Geológico da Bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte : modificado de CPRM (2003).

Quanto ao Grupo Urucuia verifica-se que a porção superior desta unidade, encontra-se silicificada (80 a 150 metros). A Formação Posse é constituída por arenitos eólicos, finos a médios, com grãos de quartzo subarredondados e estratificações cruzadas de grande porte, formando uma geometria clássica de migração de campo de dunas. Secundariamente, ocorrem lentes argilosas e leitos conglomeráticos constituídos por seixos e matacões de arenitos finos, imersos em matriz areno-argilosa.

A Formação Serra das Araras sobreposta aos sedimentos da Formação Posse, evidencia uma mudança de ambiente desértico para um ambiente úmido, com predomínio de depósitos fluviais em áreas de planície. É caracterizada pela presença de arenitos brancos, amarelados e avermelhados, argilitos e conglomerados intercalados.

A direção da rede de drenagem na Bacia do Rio das Fêmeas corresponde à direção do sistema de falhas e fraturas, que é aproximadamente N50-70E.

Dados mais recentes indicam que na porção centro-norte da sub-bacia Urucuia, os sedimentos do Grupo Urucuia cobrem discordantemente sedimentos arenosos, de provável origem eólica, com espessura superior a 250 metros na porção central da bacia, e arenitos argilosos intercalados por pelitos, em direção ao bordo leste da bacia (KIANG; SILVA, 2015). O estudo mostra que a sucessão psamítica/pelítica que grada acima para depósitos predominantemente arenosos, representa a sedimentação continental, em condições de crescente aridez, que vigorou do final do Permiano ao Triássico, materializada respectivamente pelas formações Motuca e Sambaíba da Bacia do Parnaíba.

### **3.8 HIDROGEOLOGIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA**

O trabalho de Gaspar (2006) foi o primeiro a caracterizar regionalmente o SAU. Os estudos anteriores, muitas vezes, citavam a região do SAU como uma área de potencial hidrogeológico restrito. Os autores apontavam a morfologia de tabuleiro elevado e a pouca espessura das camadas como fatores limitantes à sua

exploração, além disso, acreditava-se que o SAU era apenas um meio transmissor de água para os calcários subjacentes do sistema cárstico-fissural.

Ao longo dos anos, no entanto, foi-se percebendo que o potencial do SAU era maior que esperado, como indicou a construção de poços com vazões superiores a 500m<sup>3</sup>/h para implantação de projetos de irrigação, e os estudos sobre a contribuição do SAU para os afluentes da margem esquerda do médio Rio São Francisco. O aumento no número de estudos sobre o SAU coincidiu com a ocupação do oeste baiano por grandes empresas do ramo da agricultura, uma vez que, diversos estudos foram desenvolvidos pela Secretaria de Recursos Hídricos da Bahia (SRH-BA), pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e por empresas de consultoria visando suprir a carência de dados que ajudassem na concessão das outorgas solicitadas pelos produtores para projetos de irrigação (GASPAR, 2006)

O termo "Sistema Aquífero Urucuia" foi adotado por Gaspar (2006) para designar o conjunto de aquíferos pertencentes a uma mesma unidade geológica (Grupo Urucuia), de abrangência regional, interdependentes hidráulica e/ou fisicamente. Esse sistema enquadra-se na província hidrogeológica São Francisco, é do tipo intergranular, composto por uma unidade geológica sedimentar, disposta na forma de um tabuleiro espesso, constituída de quartzos arenitos e arenitos feldspáticos eólicos bem selecionados, com presença de níveis silicificados, e em menor proporção níveis conglomeráticos.

Em quase toda a sua extensão, nos estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais, o SAU está mapeado como sobreposto ao conjunto de rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí. Na parte norte repousa sobre rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, e também diretamente sobre o embasamento granito gnáissico, as quais compõem respectivamente os sistemas aquíferos Poti-Piauí/ Serra Grande/ Cabeças e Cristalino.

No centro da sub-bacia Urucuia, recentemente Kiang e Silva (2015) apresentaram algumas questões sobre a sucessão estratigráfica conforme foi apresentado no item sobre a geologia. Os autores analisaram sequências sedimentares com base na identificação e correlação de fácies geofísicas, obtidas de perfilagens de poços profundos, e mostraram que o Grupo Urucuia cobre discordantemente sedimentos arenosos, com espessura superior a 250 metros na porção central da bacia, e arenitos argilosos intercalados por pelitos, em direção ao



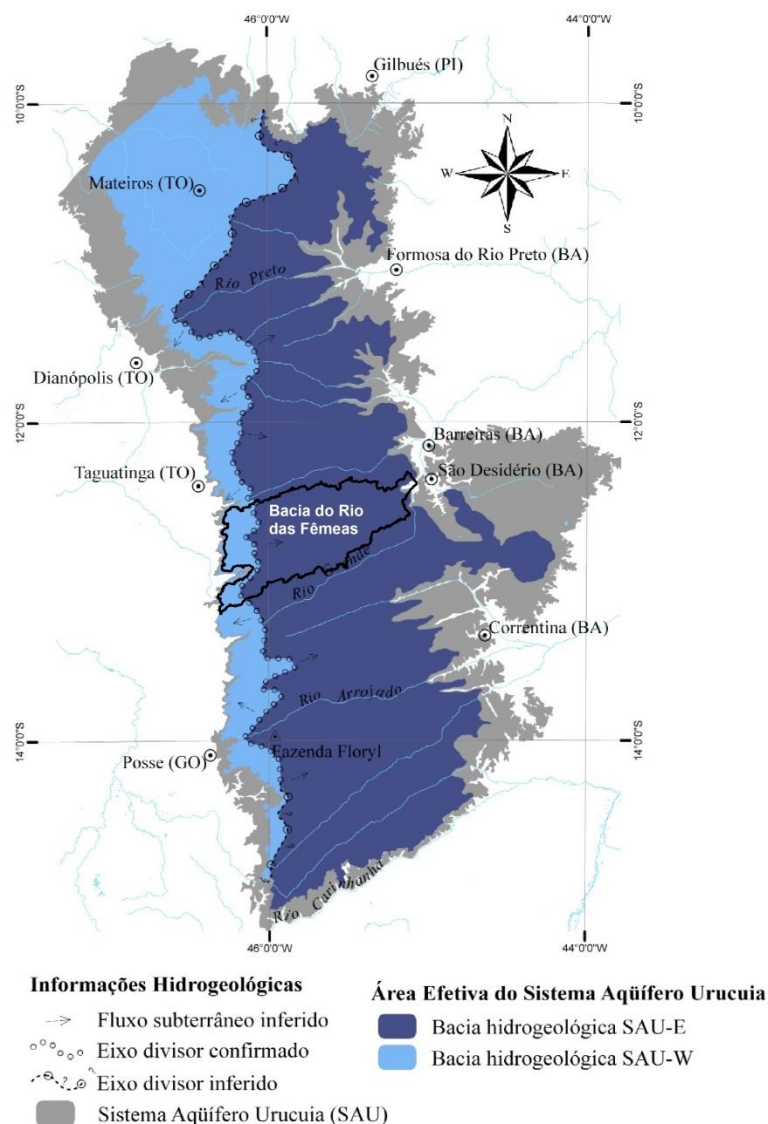
bordo leste da bacia. O estudo mostra que a sucessão psamítica/pelítica que grada acima para depósitos predominantemente arenosos, representa respectivamente as formações Motuca e Sambaíba da Bacia do Parnaíba. A inclusão dessa sucessão no Grupo Urucuia induziu a que grande parte dos pesquisadores considerassem espessuras superiores a 600 metros para o Sistema Aquífero Urucuia, quando sua espessura máxima é da ordem de 350 metros.

O SAU se estende por toda a área de ocorrência do Grupo Urucuia, no entanto, nas bordas da bacia, onde a espessura das rochas é pequena, não ocorre o armazenamento de água. Gaspar (2006) identificou a área efetiva do SAU (76.000 km<sup>2</sup>) como aquela onde o sistema desempenha as funções de unidade aquífera (armazena e transmite água). Esta definição baseou-se na análise de perfis de poços, a qual indicou que a produção dos poços perfurados nas regiões excluídas da área efetiva do SAU remete-se à exploração de águas subterrâneas armazenadas no Sistema Cárstico-Fissural Bambuí e nos Aquíferos Cristalinos.

Os estudos geofísicos realizados por Amorim Junior (2003); Amorim Junior & Lima (2003) e Amorim Junior & Lima (2007) indicaram a presença de um eixo longitudinal divisor do fluxo subterrâneo no oeste do SAU. O posicionamento aproximado desse eixo divisor de fluxo foi delineado por Gaspar (2006) com base nas observação dos níveis estáticos dos poços cadastrados na região. No oeste e norte do eixo divisor os níveis estáticos são mais profundos.

A presença do eixo divisor indica que os limites de uma bacia hidrográfica, estabelecida sobre o SAU, não coincidem com os limites da bacia hidrogeológica. A área delimitada por uma bacia hidrográfica comporta duas bacias hidrogeológicas, a bacia hidrogeológica leste (oriental) contribui com fluxo de base para a alimentação da rede de drenagem pertencente à bacia hidrográfica do São Francisco, enquanto que a bacia hidrogeológica oeste (ocidental) contribui para as drenagens da bacia do Rio Tocantins. A recarga, portanto, nessa região limítrofe do eixo divisor, distribui-se para ambas bacias hidrogeológicas. Na Figura 16 observa-se a área de ocorrência e a área efetiva do SAU e a delimitação do eixo divisor das bacias hidrogeológicas.

Figura 16 - Área efetiva do Sistema Aquífero Urucuia e posicionamento aproximado do eixo divisor do fluxo subterrâneo.



Fonte: Modificado de Gaspar, 2006.

### 3.8.1 Zona Vadosa

A zona vadosa do SAU é constituída predominantemente por espessos solos arenosos a argilo-arenosos, que atingem cerca de 35 metros de profundidade. Esses solos são constantemente submetidos ao preparo agrícola com uso de máquinas que compreende uma série de práticas que são responsáveis pela compactação do solo e consequente diminuição da infiltração.

Gaspar (2006) executou uma série de 30 ensaios de infiltração no solo da área de recarga do SAU, e demonstrou que os valores de condutividade hidráulica vertical diminuem com a profundidade da zona vadosa, havendo também redução em decorrência do manejo do solo.

Os valores de condutividades hidráulicas verticais ( $K_v$ ) obtidas nesses solos foram da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  m/s. Dentre os ensaios realizados em superfície, os valores médios de  $K_v$  situaram-se próximos de  $10^{-4}$  m/s. Nos ensaios realizados em profundidade, os valores de  $K_v$  obtidos foram da ordem de  $10^{-6}$  m/s, evidenciando uma grande homogeneidade dos solos. De forma geral, observou-se uma diminuição progressiva da  $K_v$  hidráulica com a profundidade testada. Em 33% dos ensaios realizados, observou-se uma redução nos valores de  $K_v$  de  $10^{-6}$  m/s para  $10^{-7}$  m/s, a partir de profundidades maiores que um metro (essa redução foi atribuída ao manejo do solo e ao aumento de argila no perfil do solo). Esse comportamento diferenciado em profundidade pode retardar ou desviar o fluxo vertical da água durante a recarga, induzindo um certo volume ao interfluxo, dependendo do padrão geomorfológico local.

### 3.8.2 Recarga

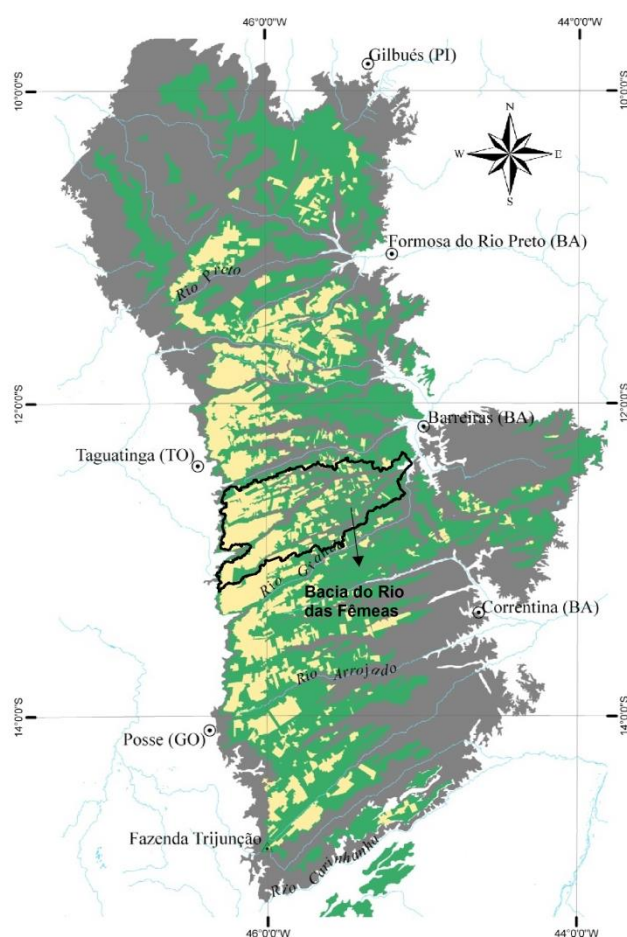
A área de recarga do SAU foi demarcada com auxílio de imagens de radar e dados digitais de elevação do terreno por Gaspar (2006) em 55.000 km<sup>2</sup> como mostra a Figura 17.

Gaspar (2006) identificou a compactação, a cobertura vegetal, a declividade do terreno, e principalmente o manejo dos solos como fatores preponderantes na recarga dos aquíferos. A morfologia de relevo é de fundamental importância para a recarga do aquífero, pois corresponde aos relevos mais planos e elevados que favorecem mais a infiltração que o escoamento superficial.

Albuquerque (2009) estimou a recarga especificamente na Bacia do Rio das Fêmeas utilizando metodologias automáticas e manuais de separação do escoamento de base. O autor encontrou a recarga de 17% como a mais coerente para a região.

Gaspar (2006) calculou a recarga em bacias hidrográficas (Rios Formoso, Arrojado, Correntina e Guará) na SAU e chegou ao valor de recarga R médio de  $1,57 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  para o período de 1982 a 2002 na área analisada, o que corresponde a cerca de 24% da precipitação P na área no período. Pimentel *et al.* (2000, apud Gaspar, 2006) obtiveram percentuais semelhantes (20%) dos valores de recarga em relação a precipitação na bacia do rio das Fêmeas no período de 1984 a 1995.

Figura 17 - Mapa das áreas de recarga do Sistema Aquífero Urucuia e áreas de recarga comprometidas pela agricultura, até o ano de 2000.



#### Informações Hidrogeológicas

■ Sistema Aquífero Urucuia (SAU)

#### Área de Recarga do Sistema Aquífero Urucuia

■ Área de recarga preservada  
(boa condição de infiltração)

■ Área de recarga comprometida pela agricultura

Fonte: Modificado de Gaspar, 2006.

### 3.8.3 Subtipos de Aquíferos e Distribuição Espacial

Gaspar (2006) diferenciou quatro subtipos de aquíferos no SAU baseado em variações faciológicas verificadas em perfis litológicos de poços. A autora verificou que a presença de níveis silicificados e as variações granulométricas dos arenitos são os principais parâmetros controladores da presença e/ou predominância deste ou daquele subtipo de aquífero dentro do sistema. Os subtipos de aquíferos identificados foram: aquífero livre regional; aquífero suspenso local; aquífero confinado ou semi-confinado e aquífero livre profundo.

O Aquífero Livre Regional é a maior unidade hidrogeológica do SAU e se sobrepõe aos outros subtipos. Apresenta nível estático variável, e é normalmente explorado por meio de poços tubulares de cerca de 100 metros de profundidade.

O Aquífero Suspenso local está associado à presença de níveis silicificados rasos e de extensão limitada, e sua distribuição ocorre de forma irregular na área do SAU. Esses níveis retardam a drenagem vertical da água, o que permite o acúmulo de água, provavelmente temporário, acima do nível d'água regional; podendo assim, dispor-se acima de outros subtipos dentro do sistema. O adensamento da vegetação é, muitas vezes, um indicativo da presença desse subtipo.

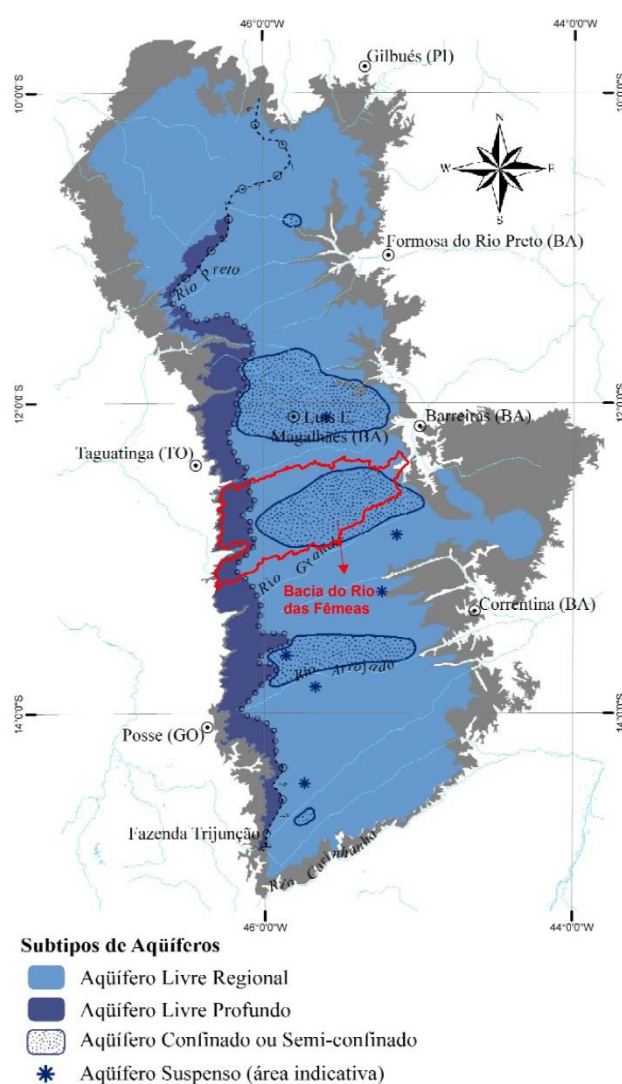
No Aquífero confinado ou semi-confinado a condição de artesianismo é controlada pela presença de níveis silicificados mais profundos. Entretanto, é comum a presença de vários níveis silicificados no perfil em diferentes profundidades. Esses níveis funcionam muitas vezes como aquitardes, permitindo uma drenagem vertical lenta de água da camada superior. Gaspar (2006) verificou que a maioria dos poços tubulares profundos utilizados em pivôs extrai água desse subtipo de aquífero. São comuns na região de Luís Eduardo Magalhães (BA), nas bacias dos rios das Éguas e Arrojado, na bacia do rio das Fêmeas, e na parte norte, no município de Formosa do Rio Preto. O nível potenciométrico nesse subtipo de aquífero é bastante variável, da ordem de 12 a 70 metros.

O contexto do Aquífero livre profundo inclui a bacia hidrogeológica oeste, situada à oeste do eixo divisor de fluxo do SAU. Os poços perfurados nesse aquífero apresentam níveis estáticos profundos, em sua maior parte, mais profundo que 100

metros. A superfície potenciométrica nesse contexto tem um aumento progressivo da profundidade, na direção do limite físico da Serra Geral de Goiás. O seu fluxo de base contribui para as nascentes na base da chapada, que alimentam os rios da região cárstica e cristalina de Goiás e Tocantins.

A disposição espacial dos quatro subtipos de aquíferos dentro do SAU está apresentada no mapa da Figura 18.

Figura 18 - Delimitação espacial dos subtipos de aquífero do Sistema Aquífero Urucuia.



Fonte: Modificado de Gaspar, 2006.

### 3.8.4 Parâmetros Hidrodinâmicos

Gaspar (2006) indicou os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos com base na interpretação de dados de ensaios de bombeamento de poços existentes na região. A autora salientou que apesar do número significativo de poços cadastrados apenas um número restrito tem os dados de ensaios de bombeamento disponibilizados.

Os dados disponíveis permitiram uma caracterização preliminar para os subtipos: aquífero livre regional, aquífero livre profundo e aquífero semi-confinado. O subtipo aquífero suspenso local não foi passível de avaliação, visto que não foram obtidos poços cadastrados nesse contexto.

As informações disponíveis para a avaliação do subtipo aquífero livre regional correspondem a quatro poços situados no extremo sul da área efetiva do SAU. Os poços são relativamente rasos, com níveis estáticos igualmente rasos, com vazões de teste de cerca de 10m<sup>3</sup>/h. As descrições dos perfis dos poços indicam arenitos médios, finos a muito finos, bem selecionados, pouco consolidados, com grãos bem arredondados e aspecto homogêneo. Os valores de K obtidos da ordem de 10<sup>-6</sup> e 10<sup>-7</sup> m/s são característicos de areia fina a areia argilosa, o que corresponde ao material descrito nos perfis dos poços.

O subtipo aquífero livre profundo, situado à oeste do eixo divisor de fluxo subterrâneo, tem como exemplo de dimensionamento hidrodinâmico as informações do ensaio realizado em um poço a oeste do município de Correntina (BA), com 242 metros de profundidade e nível estático de 132 metros, que atravessou quartzito arenitos médios, bem selecionados. O ensaio consistiu num bombeamento contínuo durante 24 horas a uma vazão constante média de 80 m<sup>3</sup>/h, e recuperação do rebaixamento de 6,09 metros em apenas um minuto. O valor de K obtido foi de 3,92·10<sup>-6</sup> m/s.

O subtipo Aquífero confinado ou semi-confinado tem muitos poços produtores instalados no seu domínio, os quais são utilizados em projetos de irrigação. Os valores de K obtidos apresentaram certa uniformidade nos resultados, com valores da ordem de 10<sup>-6</sup> m/s para K, e 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s para T. Os valores de S obtidos foram da ordem de 10<sup>-4</sup>.

### 3.8.5 Análises Isotópicas

Foram coletadas pela ANA (2013b) 40 amostras de água do SAU para análise dos isótopos ( $^{18}\text{O}$ ) e deutério (D), 14 para análise de Carbono-14 ( $^{14}\text{C}$ ) e 23 de trítio ( $^3\text{H}$ ).

Verificou-se que a maioria das amostras, tanto as coletadas nas nascentes quanto nos poços, tem composição isotópica ( $^{18}\text{O}$  e D) 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  $\delta\text{D}$ .

Considerando o  $^{14}\text{C}$ , as idades encontradas variam de 450 anos a 2.840 anos, sendo que as mais antigas estão predominantemente localizadas na borda oeste da sub-bacia Urucuia.

Para análises de  $^3\text{H}$ , os valores de  $\delta^3\text{H}$  variam de 0,8 TU a 1.8 TU. 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 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.

### 3.8.6 Geofísica

Os estudos geofísicos realizados na área do Sistema Aquífero Urucuia consistem de levantamentos recentes voltados para a obtenção de informações a respeito da espessura dos arenitos do Grupo Urucuia.

Gaspar (2006) executou estudo geofísico utilizando sondagens eletromagnéticas e gerou o mapa de isópacas que é apresentado na Figura 19. O mapa exhibe espessuras menores na parte leste da bacia, de cerca de 50 a 100 metros, e espessuras maiores na parte oeste da sub-bacia, com valores acima de



450 metros. Na parte sul do mapa a bacia apresenta um depocentro, onde as espessuras atingem mais de 600 metros.

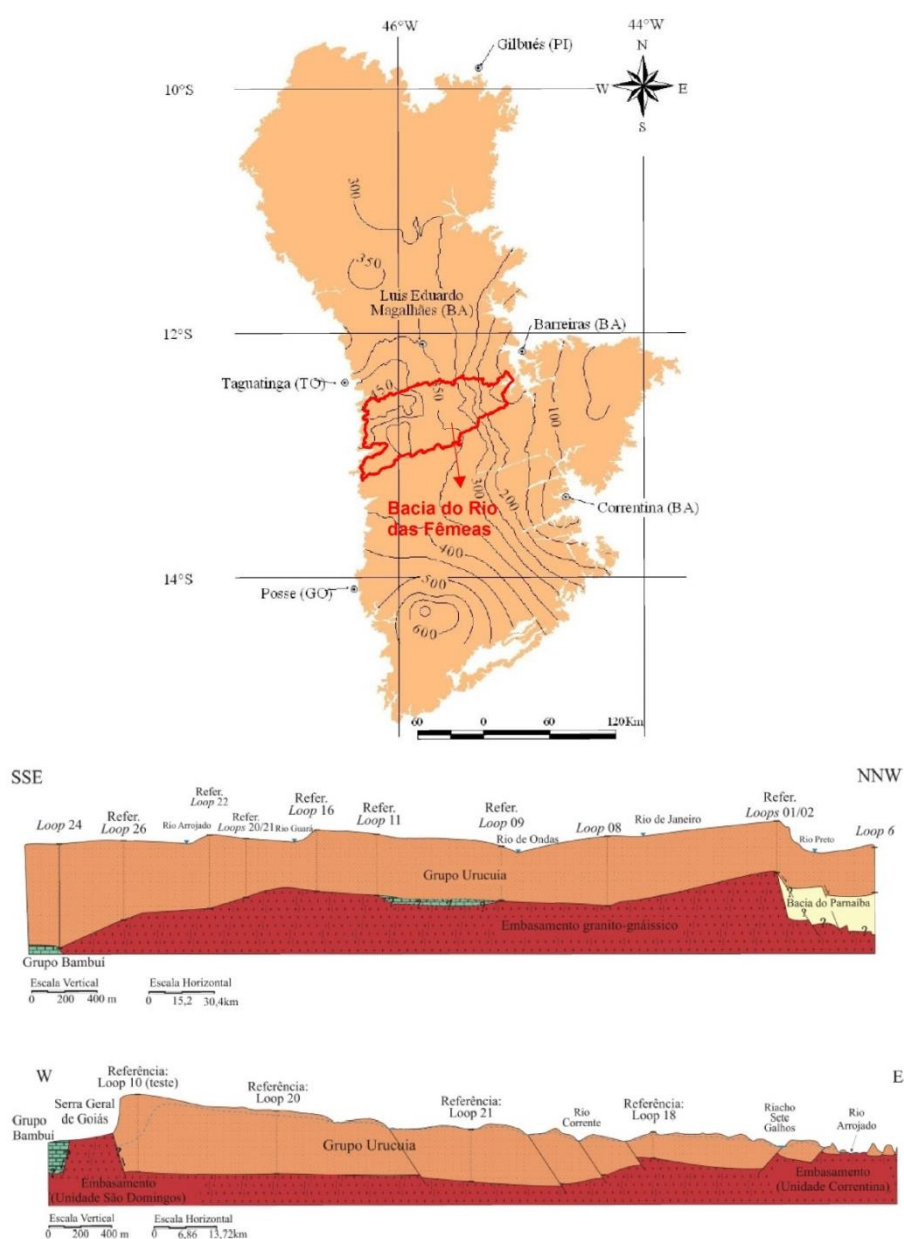
Dois perfis geoeletricos de direção EW e NNW-SSE também são apresentados na Figura 19. Observa-se no perfil de direção EW uma diminuição progressiva da espessura das rochas de oeste para leste. O perfil de direção NNW-SSE exibe o depocentro na parte sul da bacia, onde os arenitos atingem cerca de 600 metros.

Gaspar (2006) também levantou a questão sobre a presença de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. A autora citou que em muitas regiões verificou que as rochas do Grupo Urucuia estavam depositadas diretamente sobre o embasamento granítico. No entanto, como os carbonatos do Grupo Bambuí são verificados em perfis litológicos de poços e em outros estudos geofísicos a autora inferiu a presença do Grupo Bambuí no perfil NNW-SSE.

Além do trabalho de Gaspar (2006), há outros cinco trabalhos desenvolvidos na região: Bonfim e Gomes (2004), que utilizaram o método gravimétrico; Tschiedel (2004), trabalhou com o método da sondagem eletromagnética; Amorim Jr. e Lima (2003), Amorim Jr. (2003) e Lima (2000), empregaram a sondagem elétrica vertical (SEV) e a polarização induzida (IP), nas bacias do rio das Fêmeas e do rio dos Cachorros, respectivamente.

Bonfim e Gomes (2004) utilizaram informações do levantamento gravimétrico de escala regional do estado da Bahia, na escala 1: 1.000.000. Os autores reinterpretaram esses dados, com a finalidade de focalizar na investigação da topografia do embasamento da Bacia Sanfranciscana, ou seja, a espessura dos sedimentos do Grupo Urucuia. Observaram as informações de três perfis esquemáticos na região do oeste baiano. A espessura dos arenitos do Grupo Urucuia, segundo a interpretação dos autores, chega a atingir cerca de 1,5 Km de espessura, dispostos ora sobre as rochas do Grupo Bambuí ora sobre o embasamento cristalino, numa estruturação interpretada na forma de grabens. Segundo Bonfim e Gomes (2004), a estruturação em grabens permite que seja levantada a hipótese de que nem todos os sedimentos pséfíticos, psamíticos e pelíticos considerados como do Grupo Urucuia, sejam realmente pertencentes a essa unidade. Podem ser mais antigos, relacionados, por exemplo, às unidades paleozoicas da Bacia do Parnaíba.

Figura 19 - Mapa de isópacas e perfis geológicos das rochas do Grupo Urucuia – Resultados da investigação geofísica.



Fonte: Modificado de Gaspar, 2006.

Tschiedel (2004), por sua vez, realizou um levantamento de escala regional sobre as rochas do Grupo Urucuia, por meio da execução de dois perfis: um ao longo da BR-020, de direção NNE e outro nas adjacências da BR-242, aproximadamente EW. Os arenitos do Grupo Urucuia, segundo o autor, apresentaram espessuras da ordem de 300 a 600 metros.

Amorim Jr. e Lima (2003) e Amorim Jr. (2003) desenvolveram um estudo geofísico na bacia do rio das Fêmeas com o emprego dos métodos de sondagem elétrica vertical (SEV) e polarização induzida (IP) no domínio do tempo. O levantamento consistiu de 80 estações, com espaçamento médio de 6 km entre os centros das SEV's. A interpretação dos autores considerou a presença de uma zona superficial, não saturada, que pode alcançar até mais de 100 metros de espessura e uma zona saturada do sistema aquífero. Os autores detectaram ainda a existência de um eixo divisor de fluxo subterrâneo na parte ocidental da bacia, onde os níveis estáticos ultrapassam os 200 metros de profundidade; a partir desse ponto o fluxo passa a ser de leste para oeste.

Lima (2000) realizou 50 estações de SEV e IP na bacia do rio dos Cachorros. A zona não-saturada do aquífero Urucuia atinge, na área investigada, até 20 metros de profundidade. Os perfis gerados nesse trabalho mostram espessuras de até 370 metros para as rochas do Grupo Urucuia na bacia estudada.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A seleção da área de estudo levou em consideração a alta concentração de pontos de monitoramento ambiental (piezometria, pluviometria, fluviometria e qualidade da água), o elevado número de estudos de caracterização geológica, hidrogeológica, geofísica e hidrodinâmica nesta bacia, bem como a sua localização no polo agrícola do oeste baiano que implica no uso intensivo dos recursos hídricos.

### **4.2 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA**

A primeira etapa do trabalho consistiu na pesquisa bibliográfica sobre o tema interação ASub-ASup, o que permitiu elencar quais as principais técnicas aplicadas nestes tipos de estudos. Além do modelamento numérico integrado ser identificado como uma importante ferramenta nos estudos de interação ASub-ASup, não havia disponibilidade de recursos financeiros para a execução de técnicas de campo. Desta forma a pesquisa bibliográfica focou em identificar os softwares de modelamento e encontrar trabalhos que os aplicassem e avaliassem. Quando o modelo foi selecionado partiu-se para a pesquisa sobre as suas principais aplicações e características mais importantes.

### **4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

Os dados bibliográficos sobre a área de estudo (clima, geomorfologia, solos, uso e ocupação da terra, geologia e hidrogeologia) foram compilados, analisados, sintetizados e interpretados para compor a caracterização da bacia do Rio das Fêmeas. Essas informações foram fundamentais para a elaboração dos modelos hidrogeológicos conceitual e numérico.

#### 4.4 DADOS DE MONITORAMENTO

A variação do NA é um indicativo da recarga do aquífero, que por sua vez, está associada à pluviometria e pode ser influenciada por fatores como fluxo de base, exploração e evapotranspiração. Por esta razão, foram analisados não só os dados de NA, mas também os dados pluviométricos e fluviométricos visando a análise conjunta das três variáveis: NA, chuva e vazão nos cursos d'água.

Neste estudo foram considerados 16 poços de monitoramento, 8 estações fluviométricas e 5 estações pluviométricas, cujos dados estão disponíveis nos endereços eletrônicos “rimasweb.cprm.gov.br” (Nível d'água Subterrânea - NA) e “hidroweb.ana.gov.br” (pluviometria e fluviometria).

As estações pluviométricas 1245015 e 1245005 estão inseridas na Bacia do Rio das Fêmeas, as outras três, em bacias vizinhas. Para definir a área de domínio de cada estação pluviométrica foram calculados os polígonos de Thiessen. A Figura 20 mostra a distribuição espacial dos pontos de monitoramento na área de estudo e as informações mais detalhadas são exibidas na Tabela 1. Os totais pluviométricos mensais históricos constam nas tabelas do Anexo 1 ao Anexo 5.

Tabela 1 - Pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas. (Continua).

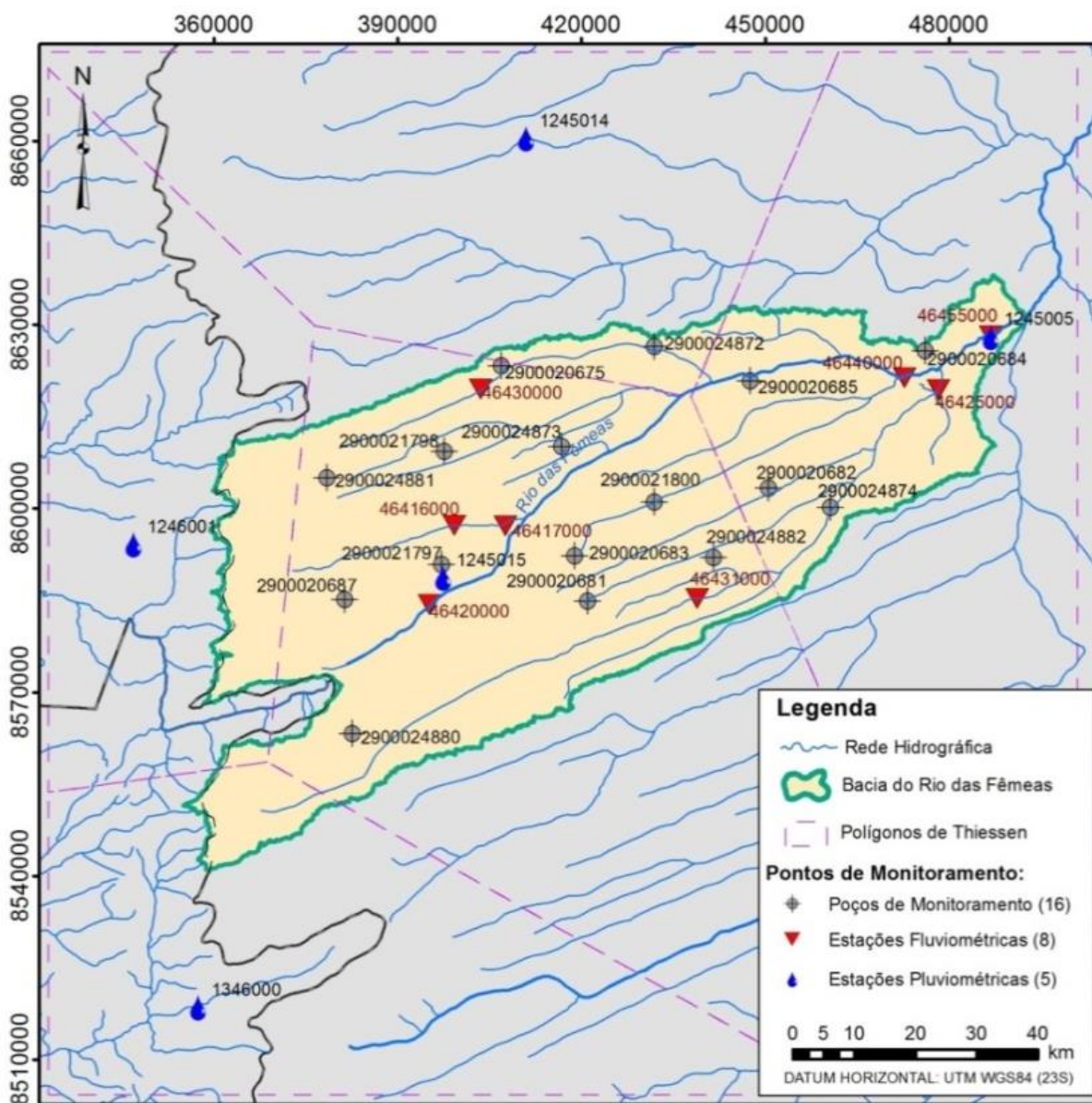
	CÓDIGO	LOCALIDADE	COORD. UTM	
			LESTE	SUL
PLUVIOMETRIA	1245005	DEROCAL	486924,4	8627950,9
	1245014	FAZENDA JOHÁ	411094,0	8660364,1
	1245015	RODA VELHA	397543,8	8588634,6
	1246001	AURORA DO NORTE	347061,2	8594090,1
	1346000	SÃO DOMINGOS	357528,5	8518526,5
FLUVIOMETRIA	46420000	RODA VELHA DE BAIXO	395149,2	8584199,3
	46431000	PONTE DAS ESTIVAS	438891,5	8585160,6
	46417000	PONTE DO MOSQUITO	407618,1	8597025,6
	46416000	BR-020	399202,3	8597089,1
	46425000	ESTIVAS	478238,1	8619253,9
	46430000	FAZENDA SÃO JOÃO	403530,9	8619377,0
	46440000	FÊMEAS GRANDE	472681,3	8621217,6
	46455000	DEROCAL	486717,9	8628039,3
PIEZOMETRIA	2900020675	FAZENDA PIONEIRA	407020,4	8623167,2
	2900020681	FAZENDA RIO BRILHANTE	421074,7	8584778,3
	2900020682	FAZENDA BURITIS	450617,7	8603246,3
	2900020683	FAZENDA ESTÂNCIA	419033,4	8592206,8
	2900020684	FAZENDA FLOR DA ESPERANÇA	476210,5	8625672,3
	2900020685	FAZENDA GALHO DO FURTADO	447689,6	8620781,3

Tabela 1 - Pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas. (Continuação).

	CÓDIGO	LOCALIDADE	COORD. UTM	
			LESTE	SUL
PIEZOMETRIA	2900020687	FAZENDA SANTO ÂNGELO (RODA VELHA)	381455,9	8585069,0
	2900021797	LOTEAMENTO CAMP. BELOS- RODA VELHA	397325,0	8590784,4
	2900021798	FAZENDA CHAPARRAL	397771,3	8609188,4
	2900021800	FAZENDA SÃO MIGUEL	432039,9	8600996,2
	2900024872	FAZENDA IRMÃOS GRATT	431979,8	8626339,3
	2900024873	FAZENDA UEMURA	416900,3	8610049,1
	2900024874	FAZENDA DURR I	460727,8	8600128,7
	2900024880	FAZENDA SANTA MARIA	382663,7	8563198,8
	2900024881	FAZENDA SÃO ROQUE	378566,3	8604934,8
	2900024882	FAZENDA ALVORADA	441711,6	8591894,1

Os dados de monitoramento hidrometeorológico foram adquiridos na primeira quinzena de janeiro de 2016. O tratamento das séries de dados consistiu na elaboração de gráficos, planilhas e mapas, abordados no capítulo 5 deste texto, e resultaram em valores médios e temporais que serviram à elaboração do modelo conceitual e calibração do modelo numérico.

Figura 20 - Mapa de localização dos pontos de monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 MODELO CONCEITUAL DE FLUXO

O modelo conceitual de fluxo representa a consolidação das informações geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas sobre a área de estudo.

Inicialmente foram definidas as unidades hidrogeológicas que ocorrem na região. Isto inclui a definição da geometria, dos parâmetros hidrodinâmicos e das entradas e saídas de água da bacia. Além disso, foi elaborado o mapa potenciométrico utilizando os níveis d'água médios referentes ao período de monitoramento de 2011 a 2015. Como a flutuação dos níveis é muito pequena neste período, de alguns centímetros a poucos metros, foi preferível usar os dados médios à elaborar mapas anuais ou por período (seco e chuvoso), uma vez que, os mapas ficariam muito semelhantes.

No modelo conceitual também é discutido o balanço hídrico da Bacia do Rio das Fêmeas. A recarga e o fluxo de base foram estimados pela análise dos dados de monitoramento de NA e da vazão dos rios. Ambos os métodos serão apresentados nos tópicos a seguir. Já a evapotranspiração foi compilada da bibliografia.

#### **4.5.1 Escoamento de base e cálculo de recarga**

Uma importante aplicação do monitoramento dos dados de vazão superficial é a obtenção do escoamento de base e o cálculo da recarga de água subterrânea. Neste trabalho foi aplicado o Método de Barnes (CUSTÓDIO & LLAMA, 1976) para proceder com a separação do escoamento básico (subterrâneo) em um hidrograma. O escoamento de base foi calculado para a estação 46455000, a qual representa o exutório da Bacia do Rio das Fêmeas.

Para o cálculo da recarga, o valor do escoamento de base foi comparado com a pluviometria média anual ponderada pela área dos polígonos de Thiessen. Os resultados da aplicação deste método são apresentados no item 5 deste texto (Figura 42).



#### 4.5.2 Cálculo de recarga pelo método WTF

O método da flutuação do nível d'água subterrânea (*WTF – Water Table Fluctuation*) através da abordagem da curva principal de recessão (MEINZER, 1923; SOPHOCLEOUS *et al.*, 1999; SOPHOCLEOUS, 1991; HEALY e COOK, 2002; CROSBIE *et al.*, 2005) é baseado na premissa de que a subida do NA medida em poços de monitoramento é causada pela recarga na superfície do NA. A recarga é estimada pela equação (Equação 11):

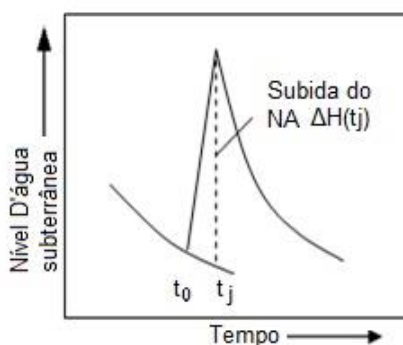
$$R(t_j) = S_y * \Delta H(t_j) \quad \text{EQUAÇÃO 11}$$

Onde,  $R(t_j)$  (m) é a recarga que ocorre entre o tempo  $t_0$  e  $t_j$ ,  $S_y$  (*Specific Yield*) é a porosidade efetiva (adimensional), e  $\Delta H(t_j)$  é o aumento do NA atribuído ao período de recarga (m). A Figura 21 mostra graficamente o significado dessas variáveis.

Foi utilizado o aplicativo MRCR desenvolvido por Heppner & Nimmo (2005), o qual é executado no programa MATLAB. Os dados de entrada no programa são as séries temporais de elevação do NA e a porosidade efetiva ( $S_y$ ).

As séries de NA foram agrupadas por ano hidrológico. Como a recarga é resultado da infiltração da pluviometria, foi decidido que o ano hidrológico iniciaria com o período chuvoso.

Figura 21 - Significado gráfico das variáveis utilizadas no cálculo de recarga pelo método WTF.



Fonte: <http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/wtf>. Acesso em 10 de junho de 2015.

Na etapa seguinte, foram selecionados os poços que apresentam séries históricas adequadas para a aplicação do método WTF. Embora muitos gráficos mostrem a tendência de rebaixamento do NA, quando observado apenas o ano hidrológico considerou-se que essa tendência não era significativa.

Com relação ao  $S_y$ , a pesquisa bibliográfica indicou que este parâmetro varia entre 0,1 e 0,15, na área de estudo, assim optou-se por calcular a recarga utilizando três valores, 0,1, 0,125 e 0,15, e discutir os valores obtidos como um intervalo de valores de recarga.

#### **4.6 MODELO NUMÉRICO**

O modelo numérico de fluxo d'água subterrânea foi executado utilizando o software MIKE SHE na versão 2014, desenvolvido pela empresa DHI.

A montagem do modelo constituiu a primeira etapa do trabalho. Nesta fase, foram definidos os limites físicos da área estudada, a distribuição das unidades hidrogeológicas e respectivas propriedades hidrodinâmicas, a inserção dos parâmetros climatológicos e a definição e alocação das condições de contorno.

Posteriormente, procedeu-se com a calibração dos níveis d'água subterrânea e do balanço de massa. O modelo foi primeiro calibrado em regime permanente e depois, utilizando os níveis calibrados no permanente como carga inicial, em regime transiente.

O modelo calibrado em regime transiente foi utilizado para a simulação do cenário de redução pluviométrica e aumento da exploração dos recursos hídricos subterrâneos com o intuito de avaliar a resposta da Bacia do Rio das Fêmeas a esse tipo de estresse.

#### 4.6.1 Malha do Modelo

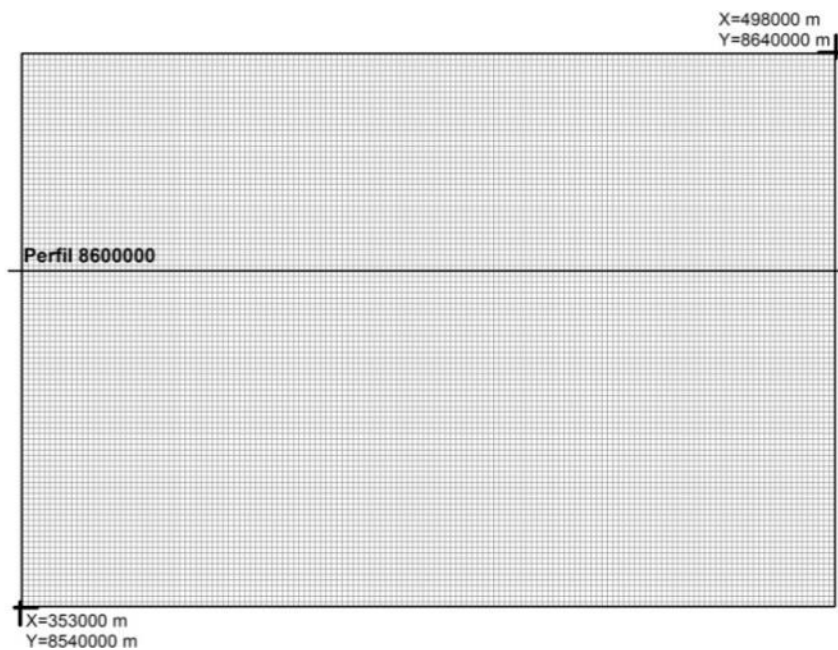
O modelo numérico foi construído com extensão de 145 km da direção Leste-Oeste e 100 km na direção Norte-Sul, resultando numa área de 14500 km<sup>2</sup>. Adotou-se o sistema de coordenadas UTM (WGS 1984 - Zona 23 Sul), sendo que as coordenadas dos limites são: (1) Direção E-W: 353000 m – 498000 m (145 km); (2) Direção N-S: 8540000 m -8640000 m (100 km).

No plano horizontal, a discretização foi feita em uma malha regular com células de 1 km<sup>2</sup> cada. Desta forma, o modelo ficou com 100 linhas e 145 colunas, resultando em 14500 células.

Na direção vertical, o domínio de cálculo foi definido com o limite superior na superfície topográfica, e o limite inferior (base) na superfície do embasamento interpretada por Amorim Jr. e Lima (2003) e Amorim Jr. (2003). A unidade modelada corresponde ao Aquífero Urucuia que, devido a sua homogeneidade, foi representado em uma única camada com espessura variável, definida pela subtração entre o topo (topografia) e a base (altitude do embasamento) da camada.

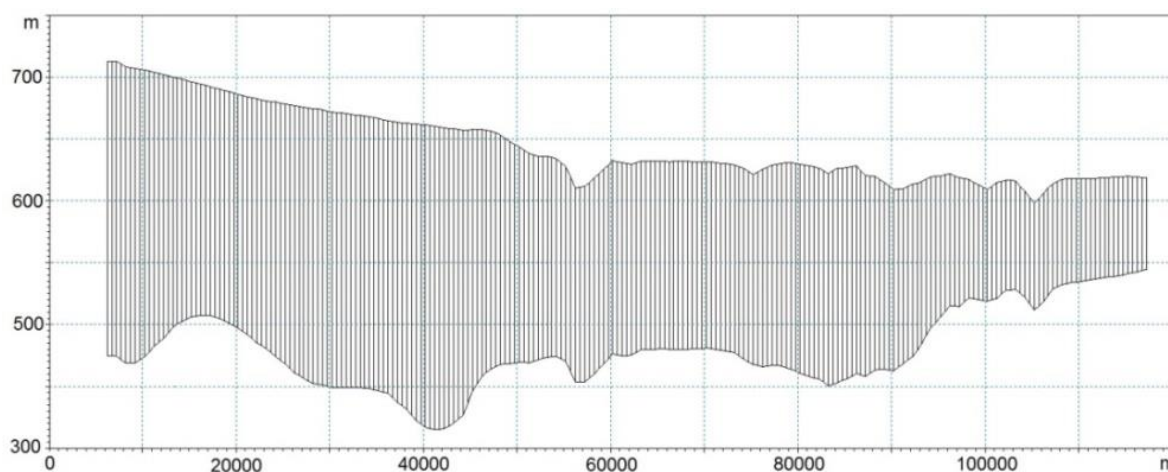
A Figura 22 e Figura 23 apresentam a discretização horizontal e vertical, respectivamente, da malha do modelo numérico. Na Figura 24 observam-se os mapas da superfície topográfica e da superfície do topo do embasamento que foram utilizados como limites verticais do modelo.

Figura 22 - Representação da discretização horizontal.



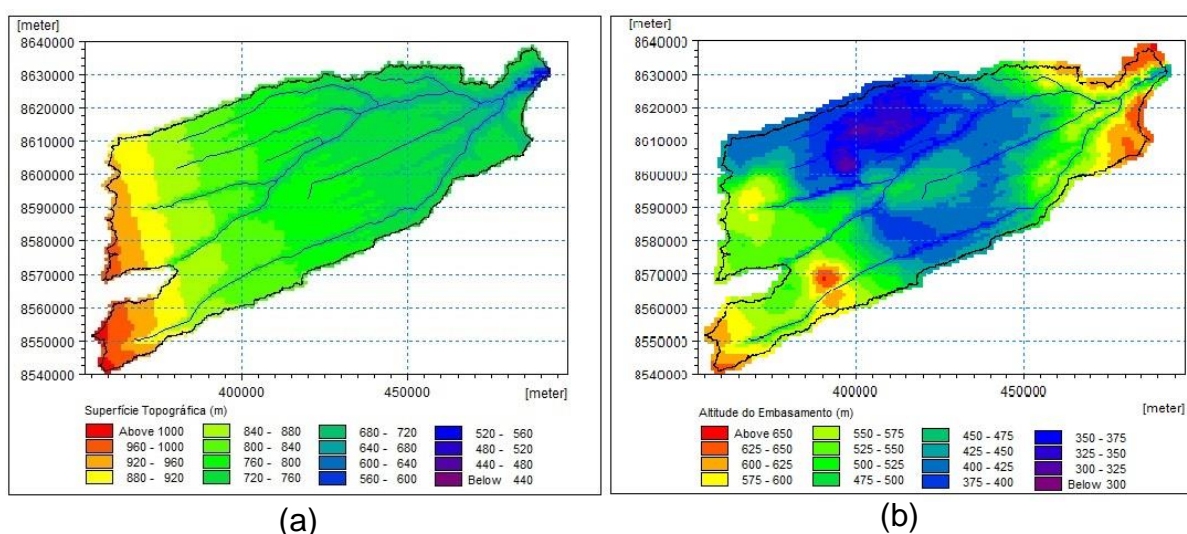
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Representação da discretização vertical (Perfil 8600000).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Discretização vertical. (a) topo – superfície topográfica, (b) base – superfície do embasamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.6.2 Condições de Contorno

As condições de contorno utilizadas no modelo numérico da Bacia do Rio das Fêmeas foram:

- Fluxo nulo nas bordas sul, norte e leste da Bacia;
- Carga Fixa na borda oeste da bacia, visando representar a continuidade do fluxo para a Bacia do Rio Paranã, afluente do Rio Tocantins.
- Drenos no interior da bacia para representar os rios e cursos d'água, inserido pelo recurso "*fixed head drain*".
- Recarga em todas as células ativas do modelo.

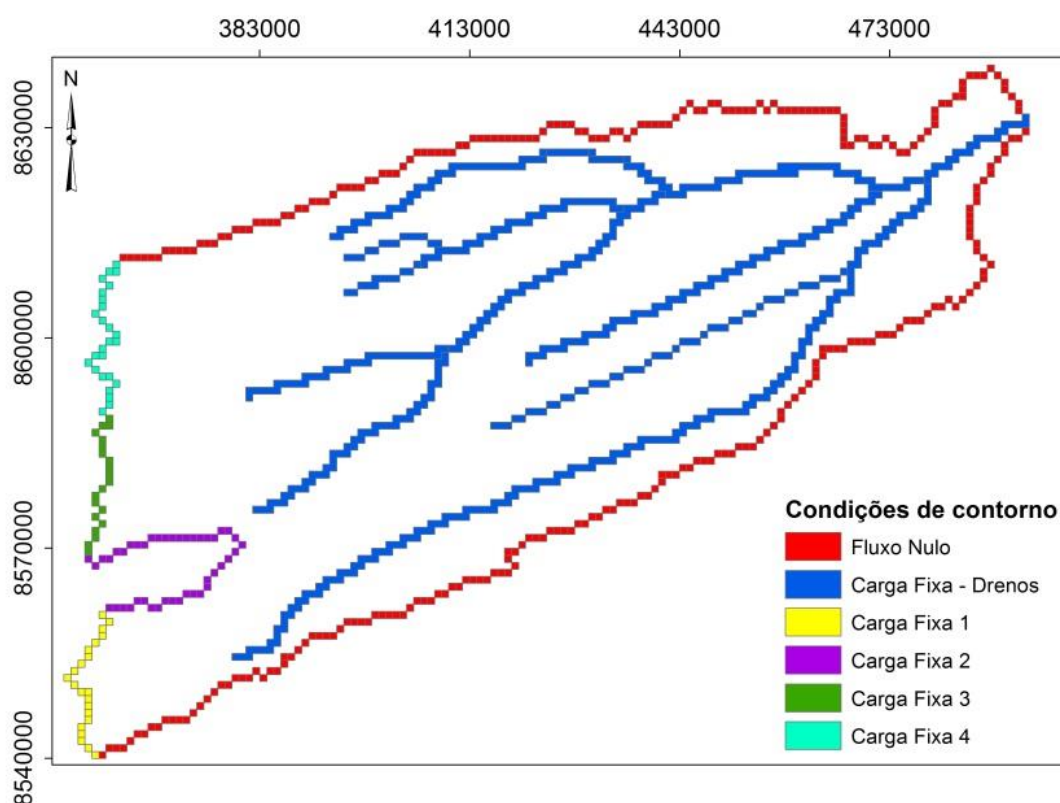
O domínio do modelo restringiu-se à área da Bacia do Rio das Fêmeas. Assim, todas as células externas a este domínio tornaram-se inativas. Salienta-se que, após este passo, o modelo ficou com 6819 células ativas. Tomando por base o modelo conceitual, foi aplicada a condição de fluxo nulo em todas células das bordas externas norte, sul e leste da bacia, já que, conceitualmente, esses locais representam divisores d'água subterrânea.

Embora quase sempre os limites de uma bacia hidrográfica correspondam a condições de fluxo zero, este fato não ocorre na borda oeste da Bacia do Rio das Fêmeas. Nessa região, o divisor d'água subterrânea está deslocado para Leste, de forma que, no leste do divisor, o fluxo segue a direção dos cursos d'água (nordeste), e no oeste do divisor, o fluxo é para oeste na direção da Bacia hidrográfica vizinha, a Bacia do Rio Paranã. Para representar este fluxo foi inserida uma condição de contorno de carga fixa na borda Oeste da bacia. Ela foi dividida em quatro partes para facilitar a distribuição das cargas durante a calibração (

Figura 25).

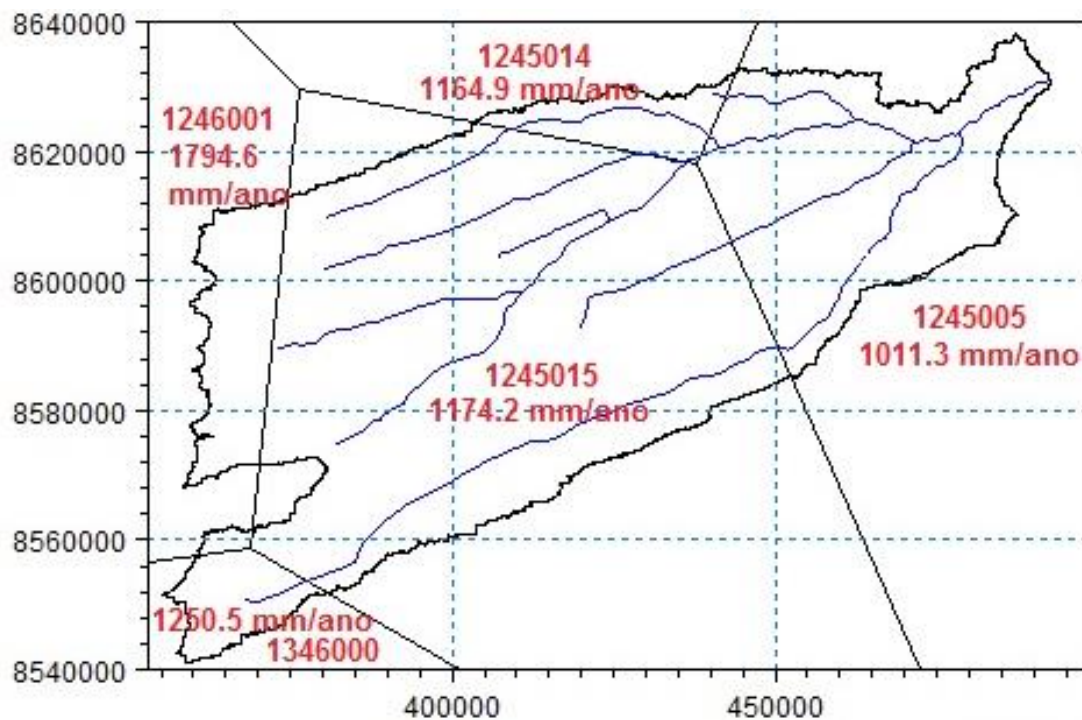
A recarga foi aplicada de maneira uniforme em todas as células ativas do modelo. Foram utilizados os dados de cinco estações pluviométricas para a definição das áreas com recargas diferentes, baseando-se nas áreas de influência definidas por meio dos polígonos de Thiessen. Na Figura 26 verifica-se as áreas de influência de cada estação associada à sua média anual histórica.

Figura 25 - Condições de contorno aplicadas no modelo numérico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Polígonos de Thiessen definidos para as estações pluviométricas da área de estudo.

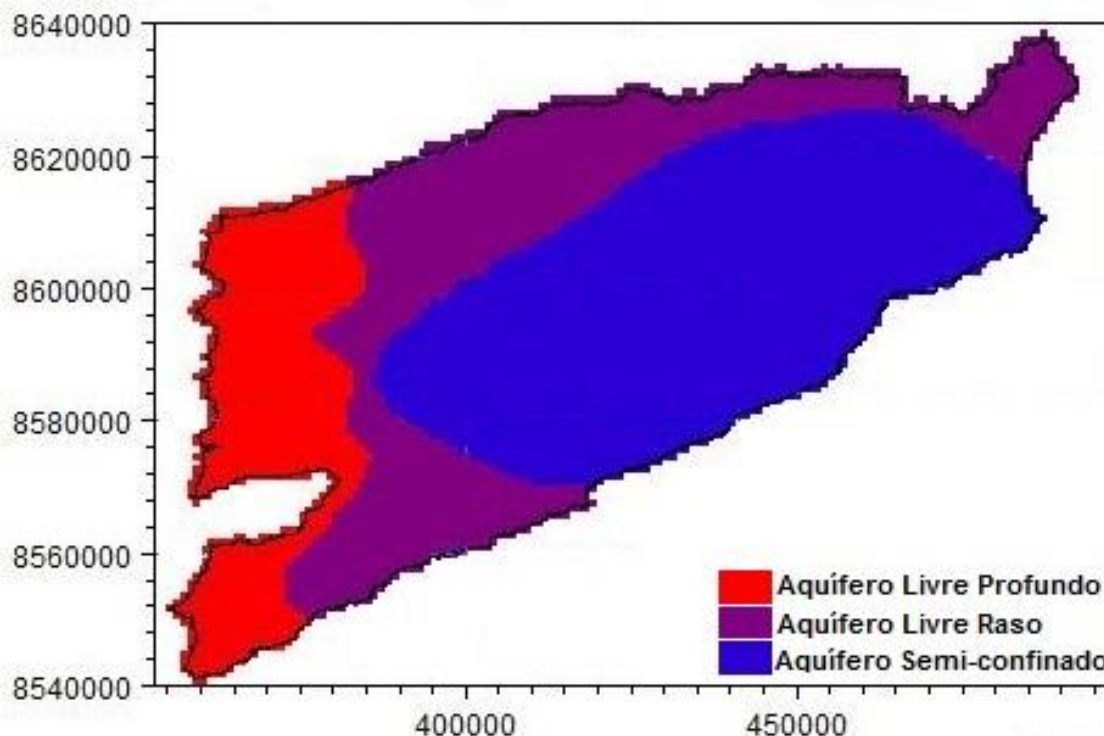


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.6.3 Propriedades Hidrodinâmicas

A unidade hidrogeológica modelada foi o Aquífero Urucuia. A definição de zonas de diferentes condutividades hidráulicas horizontais e verticais foi baseada nos três tipos de aquífero definidos por Gaspar (2006) como mostra a Figura 27.

Figura 27 - Mapa de distribuição de condutividades hidráulicas (K).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme visto anteriormente, a ANA (2013b) definiu valores de K, no Aquífero Urucua, geralmente superiores  $2.3 \times 10^{-5}$  m/s. No modelo numérico regional executado pelo autor foi adotado K uniforme de  $6.0 \times 10^{-5}$  m/s. Já Gaspar (2006) determinou valores de K da ordem de  $10^{-6}$  m/s para o Aquífero Livre Profundo, entre  $10^{-6}$  m/s e  $10^{-7}$  m/s para o Aquífero Livre Raso e  $10^{-5}$  m/s para o Aquífero Semiconfinado. Além disso, Gaspar (2006) também estimou o armazenamento (S) no Aquífero Semiconfinado em  $10^{-4}$ .

Para a calibração das propriedades hidrodinâmicas neste estudo, foi utilizada a retroanálise manual dos resultados gerados a cada tentativa de calibração, chegando aos valores que serão apresentados no capítulo sobre os resultados.



#### **4.6.4 Calibração em Regime Permanente**

A etapa seguinte à montagem do modelo e alocação das condições de contorno foi a calibração em regime permanente. O regime permanente consiste numa simulação do fluxo d'água onde predomina uma condição de equilíbrio para o aquífero. Nesta condição, não existem variações das propriedades hidrodinâmicas e das condições de contorno ao longo do tempo.

Na calibração foram comparadas, manualmente, as respostas (cargas hidráulicas e vazões dos cursos d'água) calculadas pelo modelo com a situação real observada, com o objetivo de fazer os ajustes necessários para tornar o modelo o mais próximo possível da realidade. Os poços de observação e pontos de medida de vazão utilizados na calibração constam no item 4.4 deste texto, bem como na Figura 20 e Tabela 1.

O período de calibração em regime permanente refere-se ao ano de 2012 (01/01/2012 a 31/12/2012) que corresponde ao primeiro ano em que há séries de monitoramento do NA para todos os poços.

#### **4.6.5 Calibração em Regime Transiente**

O resultado da superfície potenciométrica calibrada em permanente, foi utilizado como carga hidráulica inicial para a calibração em regime transiente. No transiente o período calibrado foi de janeiro de 2013 a junho de 2015.

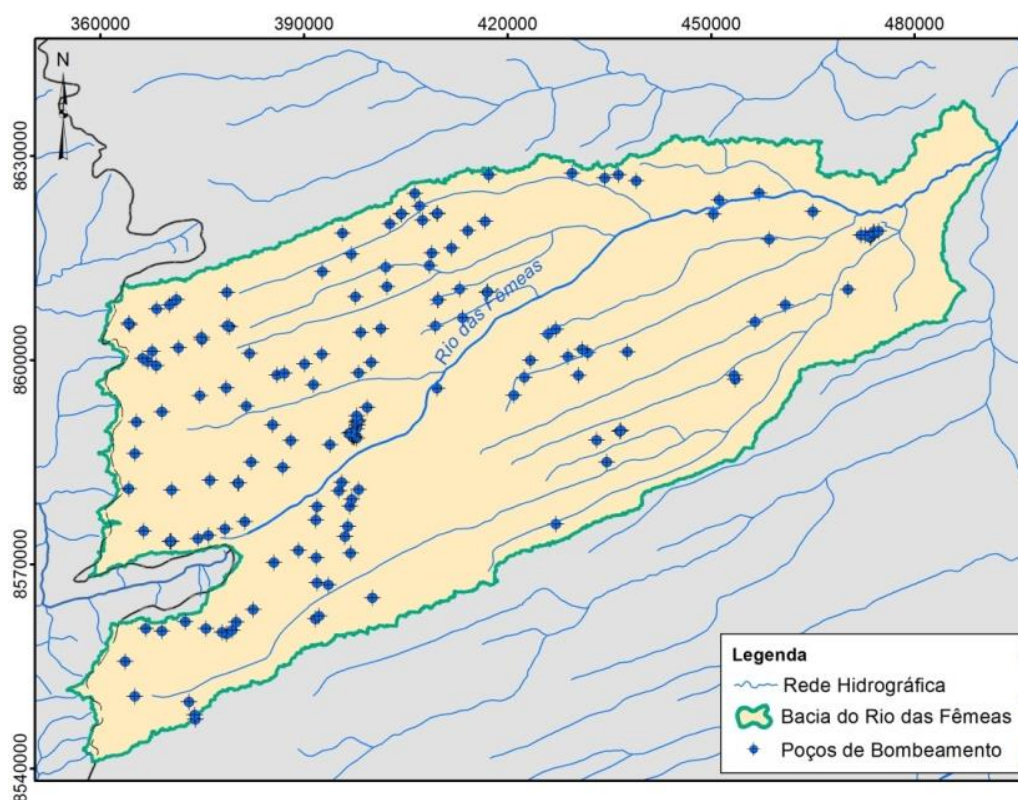
Assim como no permanente, a calibração em transiente se deu pela comparação manual dos resultados do modelo (nível d'água subterrânea e vazão dos cursos d'água) com a situação real observada, bem como pela retroanálise dos parâmetros recarga, condutividade hidráulica e armazenamento. Os poços de observação e pontos de medida de vazão utilizados foram os mesmos do permanente, e constam no item 4.4 deste texto, bem como Figura 20 e Tabela 1.

Na calibração em regime transiente foram inseridos os poços de bombeamento, cujos dados foram obtidos no Sistema de Informações de Águas

Subterrâneas (SIAGAS) e no cadastro feito por Gaspar (2006). Os dados procedentes das duas fontes de informações foram comparados e selecionados com base na quantidade de informações, localização, situação e natureza do poço. Resultando em 163 poços de bombeamento na bacia do Rio das Fêmeas (Figura 28).

As informações necessárias para a inserção dos poços no MIKE SHE foram: coordenadas, profundidade, cota topográfica, cota do topo do filtro, cota da base do filtro e vazão de bombeamento. Nem todos os poços apresentavam essas informações, por isso, nestes casos foi necessário inferi-las. Para a profundidade o valor inferido foi de 150 metros, para o posicionamento dos filtros considerou-se como a seção dos 20 metros mais profundos, e para a vazão o valor de 0.011 m<sup>3</sup>/s, em todos os casos trata-se dos valores médios dos poços que apresentavam essas informações. Já a cota topográfica foi extraída diretamente do MDE.

Figura 28 - Poços de bombeamento inseridos no modelo numérico calibrado em regime transiente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.7 SIMULAÇÃO**

Essa etapa do trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicabilidade do modelo desenvolvido para a análise da resposta hidrológica a um cenário envolvendo alterações na recarga e aumento de extrações por bombeamento.

O período simulado neste estudo foi de 20 anos, de julho de 2015 (fim do modelo em regime transiente) a dezembro de 2035. No cenário de simulação considerou-se redução de 50% da precipitação pluviométrica e o aumento de 1% ao ano do fluxo d'água subterrânea captado por meio de poços. Os valores de pluviometria (mm) utilizada no período de simulação refere-se aos 20 anos anteriores ao período de simulação (1995-2015).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO

A seguir apresenta-se os principais resultados da análise dos dados de monitoramento da pluviometria, dos níveis d'água subterrânea e das vazões dos cursos d'água para a área de estudo.

#### 5.1.1 Pluviometria

O tratamento dos dados pluviométricos indica que os meses mais secos na região são de maio a setembro, e os meses mais chuvosos vão de outubro a abril. A média pluviométrica histórica varia de 1011 mm na estação 1245005 (1972-2016) a 1675 mm na estação 1246001 (1973-2016). Os valores máximos, médios e mínimos por estação estão agrupados na Tabela 2.

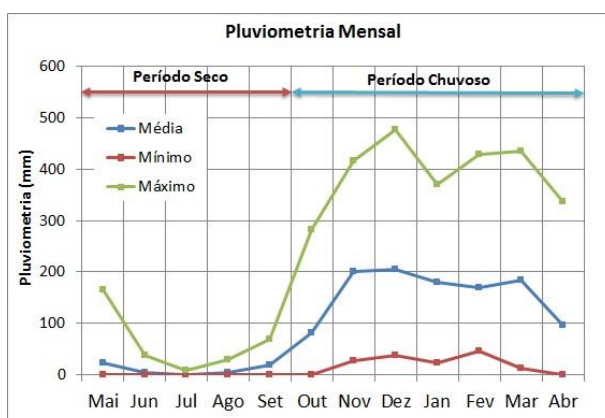
A média da pluviometria anual ponderada pela área dos polígonos de Thiessen Figura 26 resultou em 1174.82 mm/ano.

Tabela 2 - Médias, máximos e mínimos históricos de pluviometria.

Código Estação	Período de monitoramento	Média histórica (mm/ano)	Máximo histórico (mm/ano)	Mínimo histórico (mm/ano)
1245005	1972-2016 (44 anos)	1011	1514 (1989/1990)	669.7 (2010/2011)
1245014	1984-2016 (32 anos)	1165	1769.5 (1996/1997)	707.7 (2014/2015)
1245015	1984-2016 (32 anos)	1174	1861 (1996/1997)	634 (2004/2005)
1246001	1973-2016 (43 anos)	1675	3284.3 (1987/1988)	987 (1998/1999)
1346000	1969-2016 (47 anos)	1251	2008 (1973/1974)	815 (1969/1970)

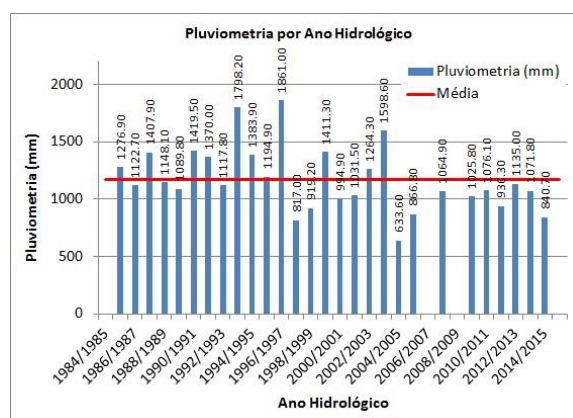
Da Figura 29 até a Figura 38 apresenta-se os gráficos da pluviometria média mensal e dos totais anuais de toda a série histórica. Merece destaque o fato de que, nos últimos anos, todas as séries de monitoramento revelam que o total pluviométrico anual está abaixo da média histórica.

Figura 29 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245015.



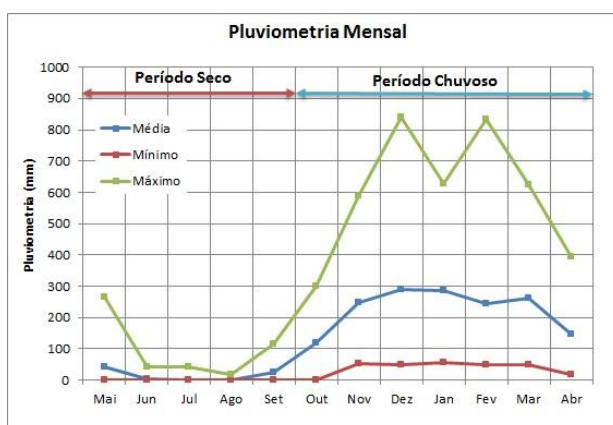
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245015.



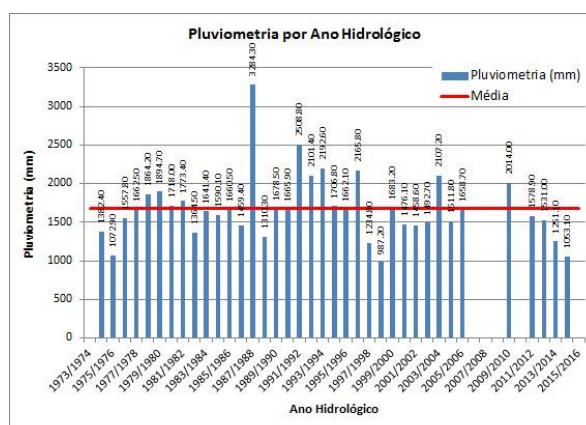
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1246001.



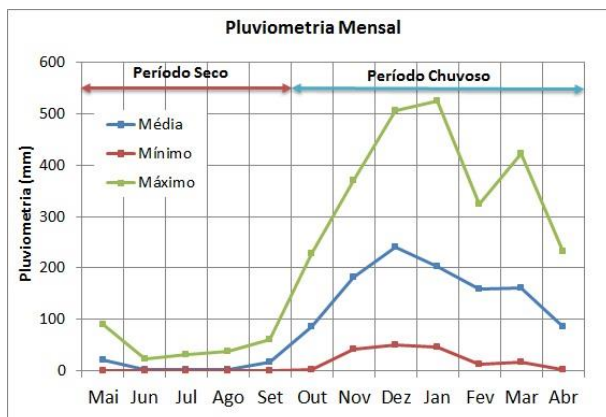
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1246001.



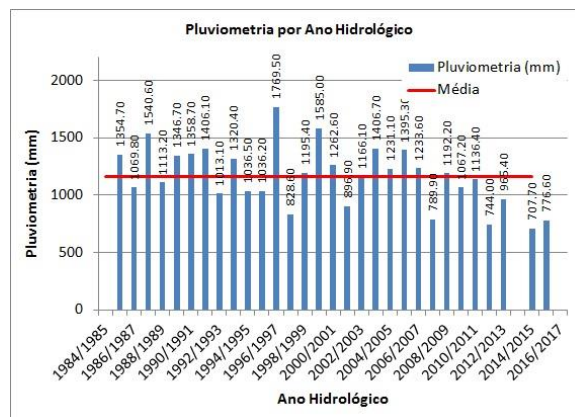
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245014.



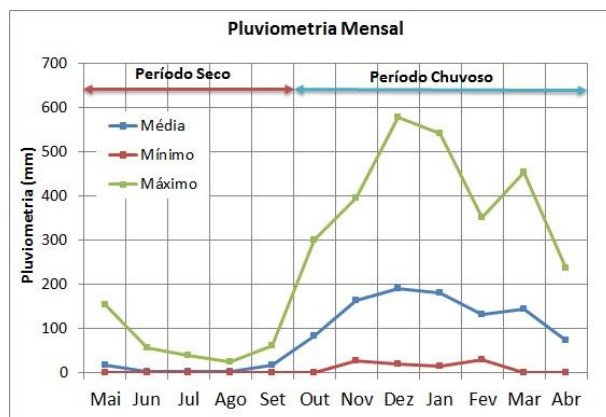
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245014.



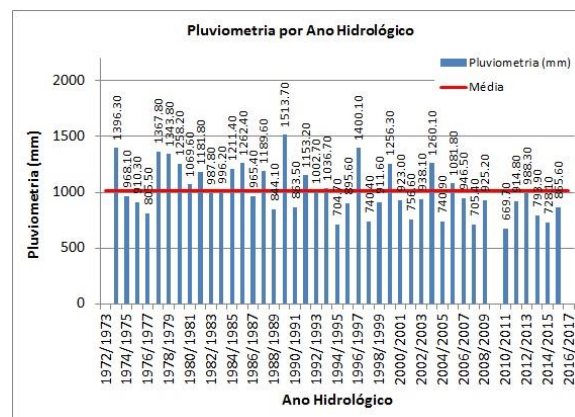
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1245005.



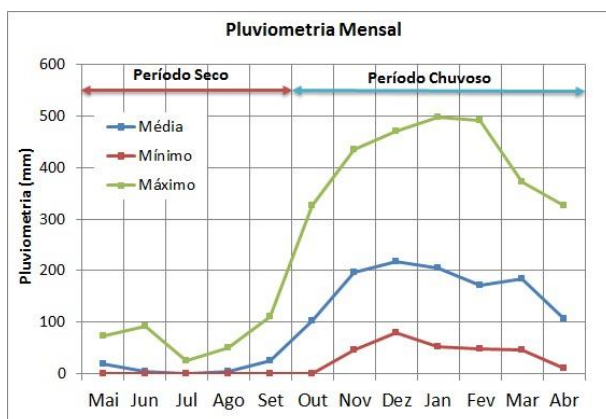
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1245005.



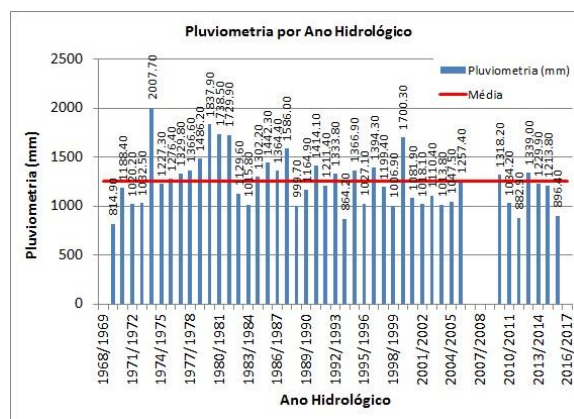
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Pluviometria média, máxima e mínima mensal – Estação 1346000.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Total Pluviométrico Anual – Estação 1346000.



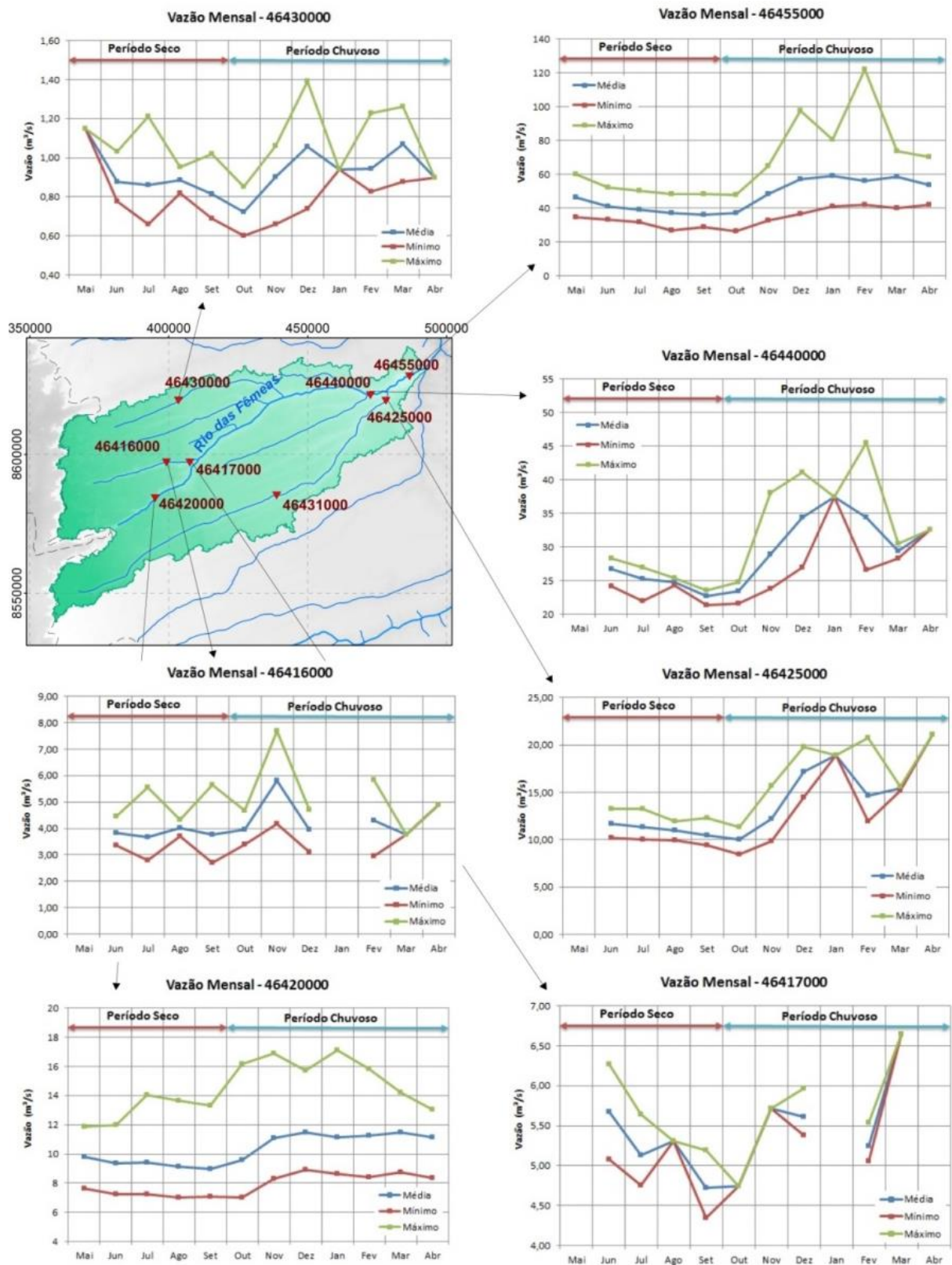
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.2 Vazões dos cursos d'água

A análise dos dados históricos de monitoramento das vazões dos cursos d'água na bacia do Rio das Fêmeas revelou descargas médias variando entre 0,9 m<sup>3</sup>/s a 48 m<sup>3</sup>/s.

Os gráficos das vazões mínimas, máximas e médias mensais de sete estações de monitoramento pluviométrico são apresentados na Figura 39. Observa-se que todos os rios monitorados são perenes, isto é, há fluxo d'água durante todo o ano.

Figura 39 - Vazões mínimas, médias e máximas mensais das estações de monitoramento fluviométrico.

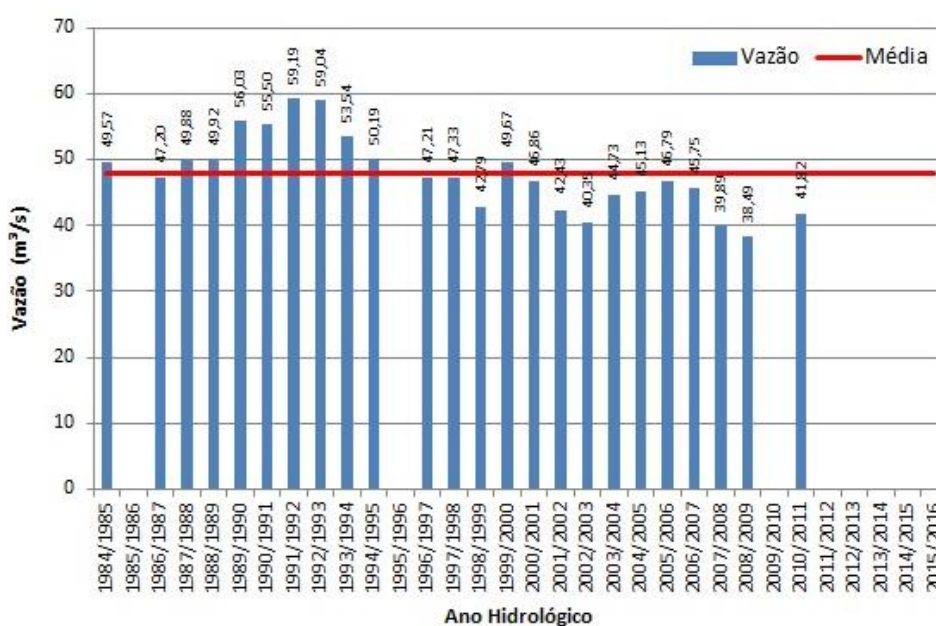


Fonte: Elaborado pelo autor.



A estação 46455000 representa o exutório da Bacia do Rio das Fêmeas, logo, apresenta as vazões mais elevadas. Na Figura 40 é possível observar o gráfico das vazões médias anuais desta estação, sendo que a média do período de monitoramento corresponde a 48 m<sup>3</sup>/s. Verifica-se a tendência de redução da vazão ao longo dos anos, tanto é que desde o ano 2000 as vazões estão abaixo da média histórica. Este fato pode ser resultante da redução das chuvas na região, do aumento do volume de captação de águas superficiais, ou ainda da redução do escoamento básico para os cursos d'água da região. Diante dos dados expostos não é possível concluir de forma efetiva qual a causa desta redução, apenas fazer tais suposições. O mais provável, no entanto, é que seja a soma desses três fatores.

Figura 40 - Vazões médias por ano hidrológico na estação 46455000.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Níveis D'água Subterrânea

Os resultados do monitoramento na Bacia do Rio das Fêmeas revelam que os níveis d'água subterrânea acompanham aproximadamente a superfície topográfica, variando de cerca de 3 a 73 metros de profundidade. As cotas mais

baixas do NA estão nas proximidades do exutório da bacia. Constata-se também que os níveis tornam-se mais profundos de leste para oeste.

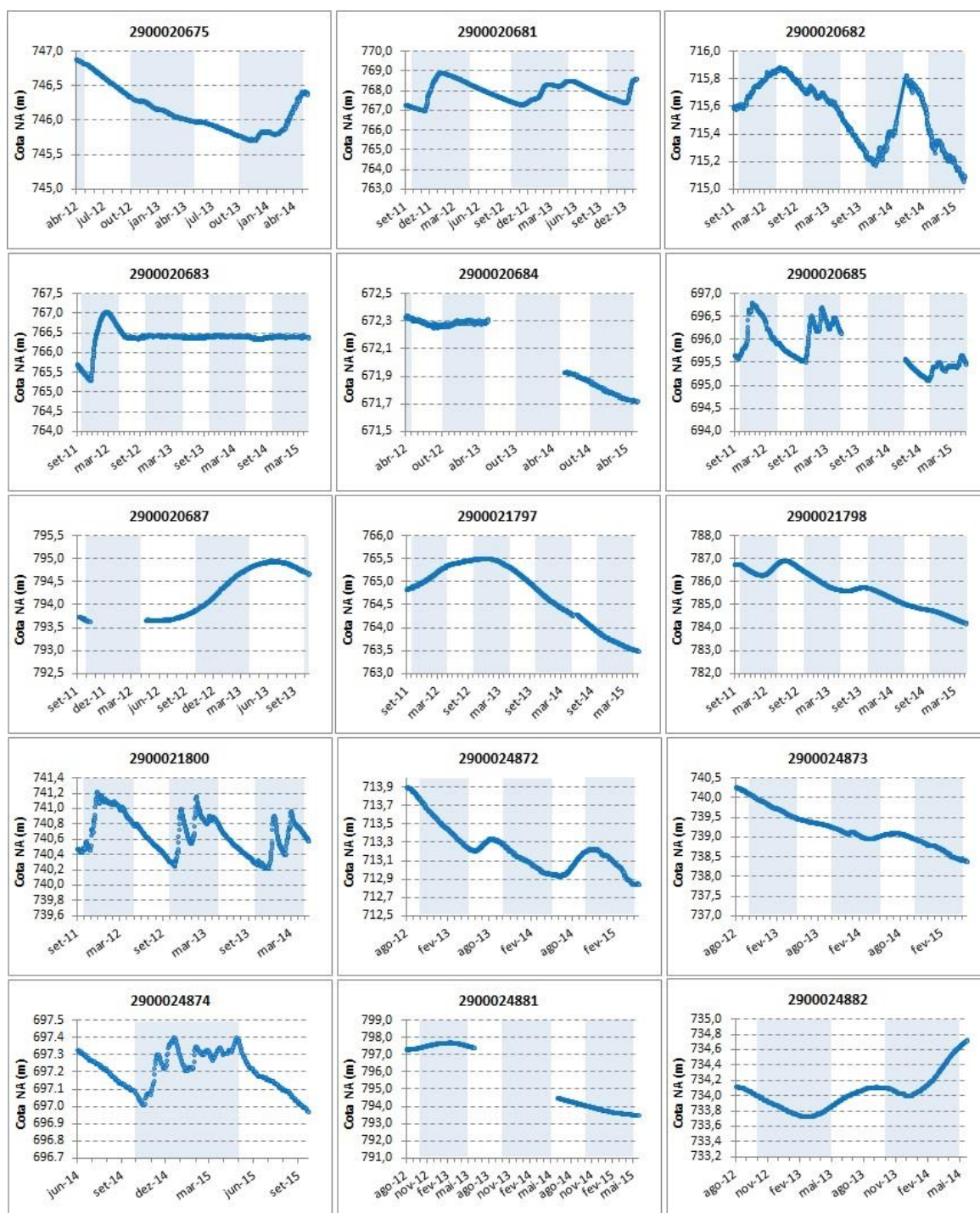
As séries históricas de monitoramento do nível d'água subterrânea são apresentadas nos gráficos da Figura 41. As áreas marcadas na cor azul indicam os períodos chuvosos na região. Uma característica observada na maioria das séries é a sazonalidade resultante das variações pluviométricas anuais. Essas variações são levadas em consideração para a calibração do modelo numérico em regime transiente. Já no permanente, o nível representado corresponde a um valor médio.

Outra característica, que se destaca é a tendência de rebaixamento do NA notada em mais da metade dos gráficos (2600020675, 2900020682, 2900020684, 2900020685, 2900021797, 2900021798, 2900024872, 2900024873, 2900024881).

Os níveis d'água em declínio podem indicar que a extração de água subterrânea está superando a recarga do aquífero. Além do mais, estiagens de longa duração, como a que tem ocorrido nesta região do nordeste brasileiro, quase sempre resultam em diminuição da recarga de águas subterrâneas. Portanto, às pressões relacionadas ao bombeamento somam-se as influências climáticas para explicar este fato. Já o poço 2900024882 é o único que apresenta a tendência de recuperação do NA ao longo dos anos de monitoramento.

A série histórica do poço 2900020683 apresenta um comportamento diferente dos demais, no primeiro ano de monitoramento é possível verificar a sazonalidade anual, no entanto, nos anos seguintes a série permanece quase constante. Neste caso a possibilidade de existir algum problema no monitoramento, seja no equipamento ou mesmo no poço, não pode ser descartada, e por isso é preciso analisar com cautela os dados deste poço.

Figura 41 - Gráficos das séries históricas de monitoramento do nível d'água subterrânea.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 MODELO CONCEITUAL

O modelo hidrogeológico conceitual consiste na consolidação das informações geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas discutidas até o momento e será apresentado no decorrer deste item.

### 5.2.1 Unidades Hidrogeológicas

A Bacia do Rio das Fêmeas apresenta um sistema hidrogeológico predominantemente homogêneo composto pelos arenitos do Grupo Urucuia. No entanto, algumas mudanças estruturais e intercalações de níveis silicificados conferem alterações físicas que permitem diferenciar as unidades hidrogeológicas Aquífero Livre Regional, Aquífero Livre Profundo e Aquífero Semi-confinado.

O Aquífero Livre Regional ocorre em toda a área ao leste do divisor de águas subterrâneas, desde a superfície do terreno até as camadas silicificadas, as quais estão situadas em profundidade variáveis (de 40 a 100 metros). É composto por arenitos médios, finos a muito finos, bem selecionados, pouco consolidados, com grãos bem arredondados e aspecto homogêneo. Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos na literatura indicam K da ordem de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s.

No oeste do divisor de águas subterrâneas identifica-se o Aquífero Livre Profundo. Nesta região o embasamento da bacia Sanfranciscana é mais profundo e provavelmente em consequência disto os níveis d'água subterrânea também são mais profundos. A base da unidade hidrogeológica Aquífero Livre Profundo atinge profundidades que variam de 90 a cerca de 500 metros. A litologia predominante corresponde a quartzos arenitos médios, bem selecionados. Os valores de K nesta unidade são da ordem de  $10^{-6}$  m/s.

As lentes silicificadas propiciam a existência dos aquíferos semi-confinados no leste do divisor de águas subterrâneas. O topo do aquífero corresponde as camadas silicificadas e a base corresponde ao embasamento da

bacia Sanfranciscana com profundidades que variam de 60 a 480 metros. Os valores de K nesta unidade são da ordem de  $10^{-5}$  m/s a  $10^{-6}$  m/s.

### 5.2.2 Balanço Hídrico

A entrada de água no sistema hidrológico/hidrogeológico da bacia do Rio das Fêmeas é a precipitação pluviométrica. As saídas são a evapotranspiração, o escoamento superficial, a água exportada para outros aquíferos adjacentes e a exploração por meio de captações subterrâneas e superficiais. Também existem as trocas de água entre os meios subterrâneos e superficiais que correspondem à recarga e ao fluxo de base.

A precipitação média anual (1972 a 2016) ponderada pela área dos polígonos de Thiessen, conforme visto no Item 4.4 (Tabela 1), é de 1174.8 mm. Parte dessa água infiltra até atingir os aquíferos, recarregando-os.

Conforme já citado, a recarga na área do Aquífero Urucuaia foi estimada por estudos anteriores em aproximadamente 20% da precipitação (GASPAR, 2006; ALBUQUERQUE, 2009). Os resultados das estimativas de recarga, executadas no presente estudo, pelo método da flutuação do nível d'água e pelo método da separação do escoamento de base foram de 15% a 25% e 17% respectivamente, isto é, de 176 mm a 294 mm, conforme será demonstrado nos parágrafos seguintes.

Os resultados da aplicação do método WTF em 7 poços, cujas séries de monitoramento foram consideradas adequadas, estão agrupados na Tabela 3. Considerando os três valores de  $S_y$  citados na bibliografia, se  $S_y$  for igual a 0,1, a recarga média anual variou entre 15% e 16%, já se o  $S_y$  for igual a 0,125, a recarga média anual varia entre 19% e 21%, e por fim, fixando o  $S_y$  igual a 0,15, obtêm-se valores de recargas médias anuais da ordem de 23% a 25%.

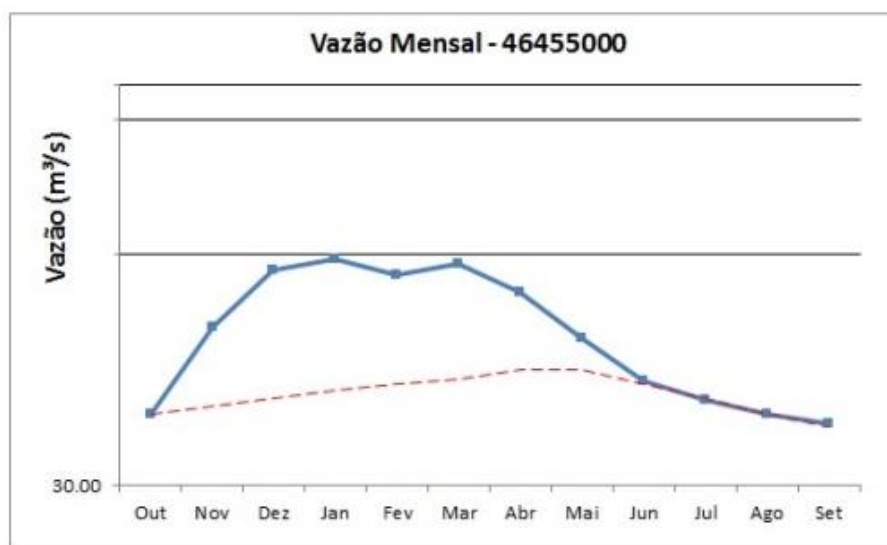
Tabela 3 - Recargas calculadas pelo método da flutuação do nível d'água subterrânea.

Poços	out-2011/set-2012			out-2012/set-2013			out-2014/set-2015		
	Sy=0,1	Sy=0,125	Sy=0,15	Sy=0,1	Sy=0,125	Sy=0,15	Sy=0,1	Sy=0,125	Sy=0,15
2900020681	19%	23%	28%	21%	27%	32%	-	-	-
2900020682	12%	16%	19%	-	-	-	-	-	-
2900020685	18%	23%	28%	-	-	-	16%	21%	25%
2900021798	11%	14%	17%	-	-	-	-	-	-
2900021800	15%	19%	22%	18%	23%	27%	-	-	-
2900024874	-	-	-	-	-	-	15%	20%	24%
2900024882	-	-	-	6%	8%	10%	-	-	-
<b>Mínimo</b>	11%	14%	17%	6%	8%	10%	-	-	-
<b>Máximo</b>	19%	23%	28%	21%	27%	32%	-	-	-
<b>Média</b>	15%	19%	23%	15%	19%	23%	16%	21%	25%

O escoamento de base médio (1984-2011) nos principais cursos d'água na Bacia do Rio das Fêmeas foi estimado em 39.5 m<sup>3</sup>/s, conforme o monitoramento da estação fluviométrica 46455000 e considerando a área da bacia de 6411 km<sup>2</sup>, isto equivale a 194.7 mm/ano. Albuquerque (2009) também já havia estimado o escoamento básico de 250 mm/ano na Bacia do Rio das Fêmeas.

A Figura 42 apresenta a separação entre os escoamentos superficial e de base, pelo método de Barnes, para o ponto de monitoramento fluviométrico 46455000. A área sob a linha vermelha tracejada representa o escoamento de base, que, conforme citado no parágrafo anterior, foi calculado em 39,5 m<sup>3</sup>/h. Comparando o valor do escoamento de base com a pluviometria e a área da bacia do Rio das Fêmeas é possível ter uma estimativa de recarga de 17% para a região.

Figura 42 - Estimativa de recarga pelo método da separação do escoamento de base (estação 46455000).



	Qtd. dias	Q. (m3/s)	E.B. (m3/s)	E.B. (m3/mês)
Out	31	37.23	37.23	99715309.78
Nov	30	48.25	38.00	98496000.00
Dez	31	57.22	39.00	104457600.00
Jan	31	59.18	40.00	107136000.00
Fev	29	56.40	40.60	101727360.00
Mar	31	58.36	41.35	110751840.00
Abr	30	53.69	42.40	109900800.00
Mai	31	46.60	42.50	113832000.00
Jun	30	41.03	40.65	105364800.00
Jul	31	38.87	39.00	104457600.00
Ago	31	37.11	37.25	99770400.00
Set	30	36.16	35.70	92534400.00
<b>Total</b>	<b>366</b>			<b>1248144109.78</b>

E.B.	39.47 m3/s
	1248144110 m3/ano
Área Bacia	6411 km2
	6411000000 m2
E.B	0.19 m/ano
	194.69 mm/ano
Pluviometria	1174.82 mm/ano
Recarga	E.B (mm/ano) ÷ Plu (mm/ano)
	17%

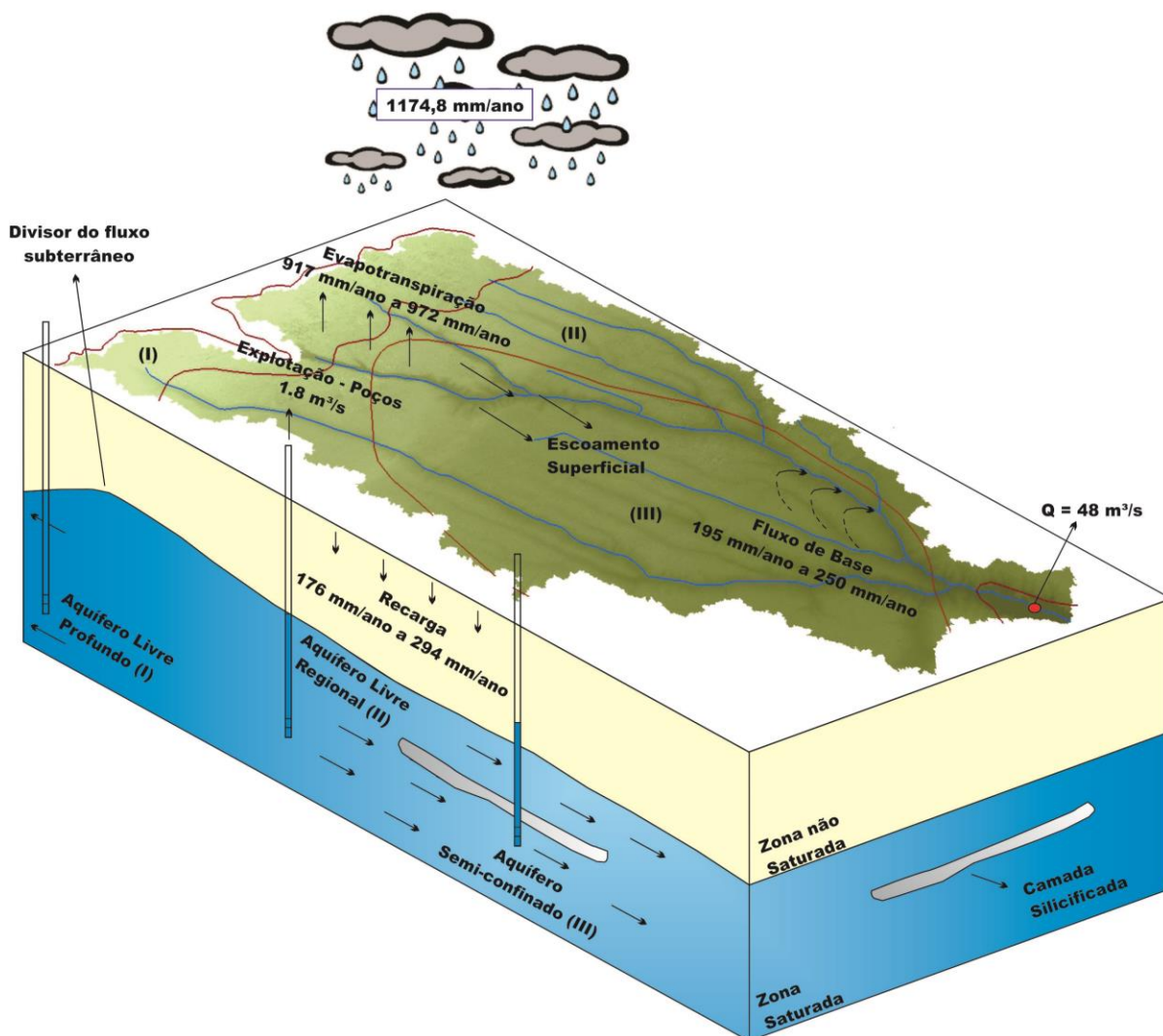
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto à evapotranspiração, as estimativas realizadas para a área de estudo por Gaspar (2006) e por ANA (2013a), por meio do balanço hídrico, foi de 917 mm e 972 mm, respectivamente.

O outro item que contribui para o balanço hídrico são as captações de água subterrânea por meio de poços. Alguns autores realizaram cadastros simplificados desses poços (GASPAR, 2006; ANA, 2013a), além disso há informações sobre os poços de bombeamento no banco do SIAGAS. Todas essas informações foram sintetizadas, chegando à estimativa de 163 poços de bombeamento com vazão média de 0.011 m<sup>3</sup>/s, ou seja, 1.8 m<sup>3</sup>/s no total.

O bloco diagrama com as informações sumarizadas e representação esquemática do modelo conceitual da Bacia do Rio das Fêmeas consta na Figura 43.

Figura 43 - Representação esquemática do modelo hidrológico/hidrogeológico conceitual da Bacia do Rio das Fêmeas. (I) Aquífero Livre Profundo, (II) Aquífero Livre Regional e (III) Aquífero Semi Confinado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

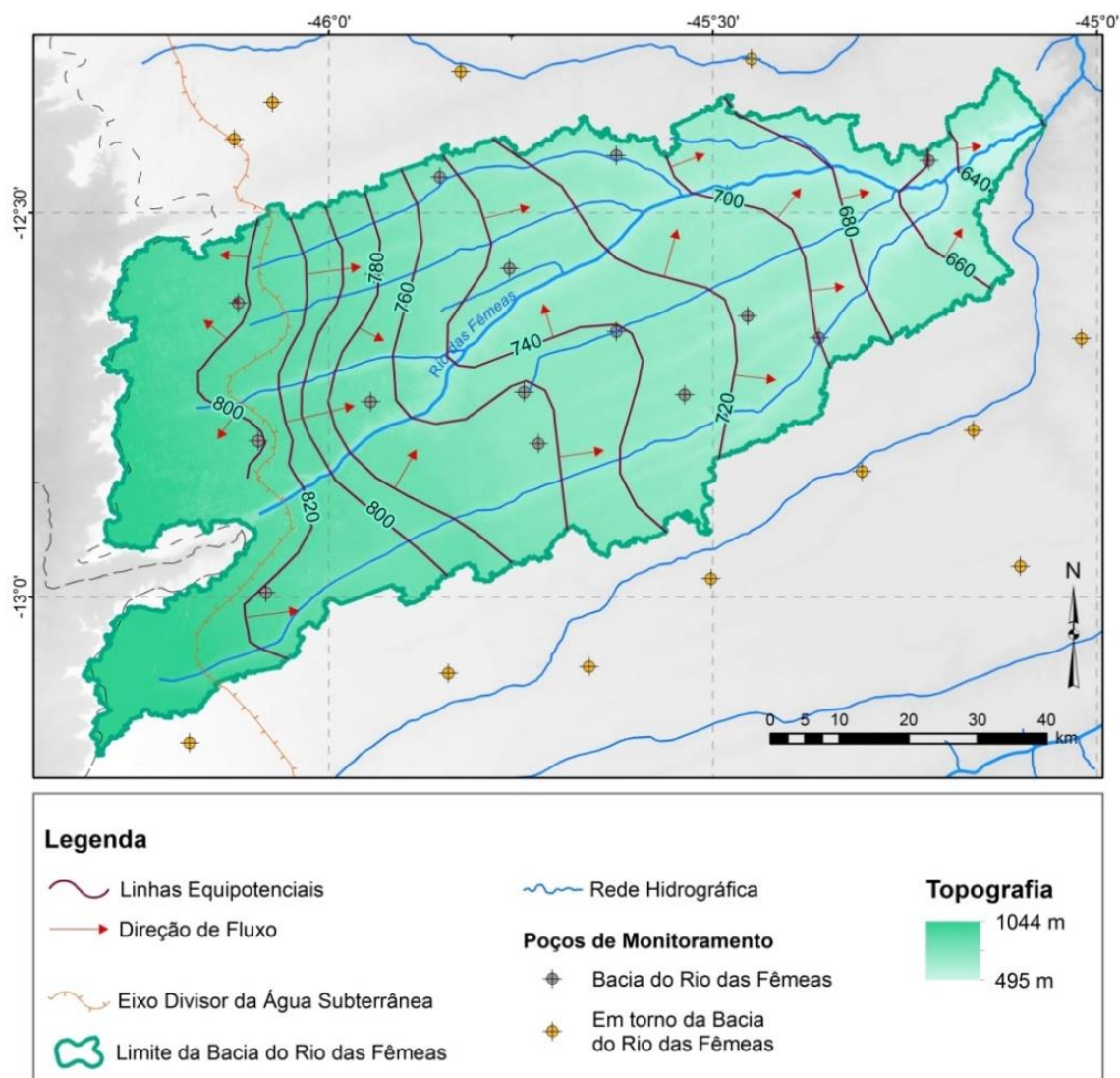


### 5.2.3 Potenciometria

As cotas do NA utilizadas na elaboração do mapa potenciométrico, apresentado na Figura 44, corresponde à média dos anos de monitoramento (2011-2015). A decisão de usar os valores médios de todo o período de monitoramento, embora a calibração em permanente tenha sido feita para o ano de 2012 e em transiente para 2013 a 2015, deveu-se ao fato de não haver grandes variações na potenciometria da área. No mapa potenciométrico elaborado as linhas equipotenciais distam de 20 metros, mas a variação sazonal do nível d'água verificada nos poços de monitoramento não ultrapassa 1,5 metros.

O mapa potenciométrico mostra que o fluxo regional d'água subterrânea na bacia hidrogeológica leste é para NE e localmente na direção dos cursos d'água, confirmando a condição efluente dos rios. Na bacia hidrogeológica oeste apenas dois poços indicam o fluxo d'água subterrânea para SW. O ideal seria adensar a rede de monitoramento d'água subterrânea nessa área.

Figura 44 - Mapa Potenciométrico da Bacia do Rio das Fêmeas (média do período de 2011-2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

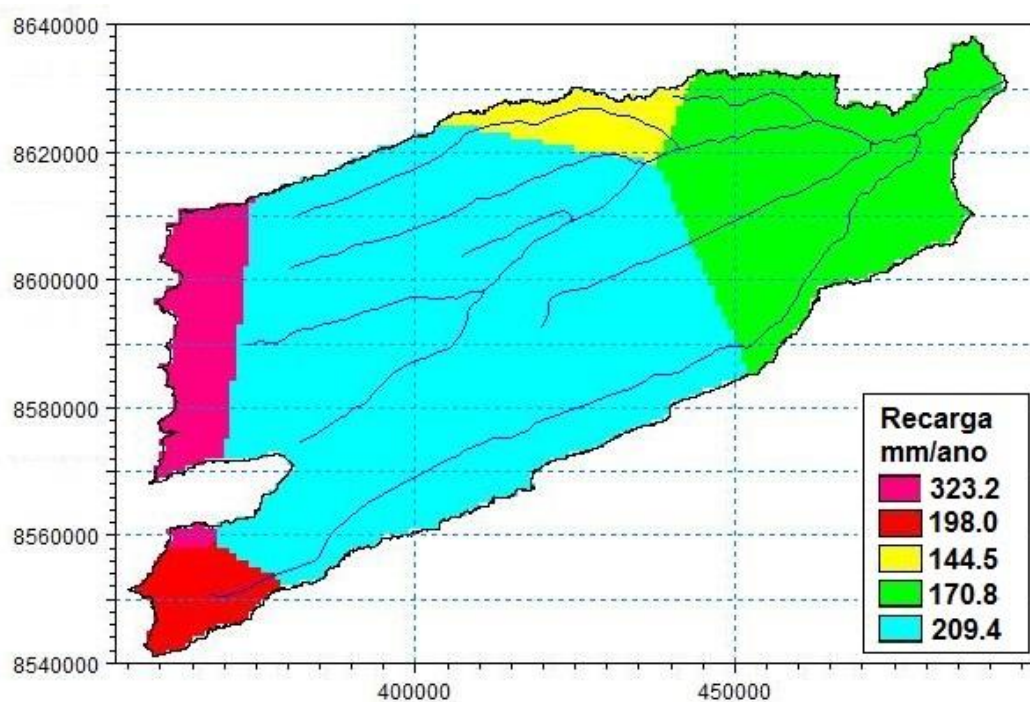
## 5.3 MODELO NUMÉRICO

### 5.3.1 Calibração em Regime Permanente

Para a calibração em regime permanente a carga hidráulica inicial (*initial head*) aplicada em todas as células ativas do modelo foi de 2 metros abaixo da topografia.

A recarga calibrada foi de 22% da pluviometria do ano de 2012, aplicada de maneira uniforme em todo o domínio modelado. Como os dados pluviométricos foram compilados de cinco estações, a recarga variou em função das áreas definidas pelos polígonos de Thiessen (Figura 26) associados a essas estações como mostra a Figura 45 e Tabela 4.

Figura 45 - Áreas de recarga e seus respectivos valores de calibração em regime permanente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Valores de recarga calibrados em regime permanente.

Código Estação	Pluviometria 2012 (mm/ano)	Recarga 22% (mm/ano)
1245005	776.5	170.8
1245014	656.7	144.5
1245015	951.7	209.4
1246001	1469.1	323.2
1346000	899.9	198.0

As cargas fixas atribuídas à borda oeste da bacia para representar a continuidade do fluxo subterrâneo nesta direção foram calibradas conforme mostra a

Tabela 5, a seguir. Esses valores foram estabelecidos por meio de retroanálise, tomando como referência as cotas topográficas, estimadas pelo MDE, das nascentes do Rio Paranã, vizinhas ao talude oeste.

Tabela 5 - Cargas hidráulica da condição de contorno carga fixa calibradas em regime permanente.

<b>Código</b>	<b>Carga Hidráulica (m)</b>
Carga Fixa 1	610
Carga Fixa 2	770
Carga Fixa 3	450
Carga Fixa 4	600

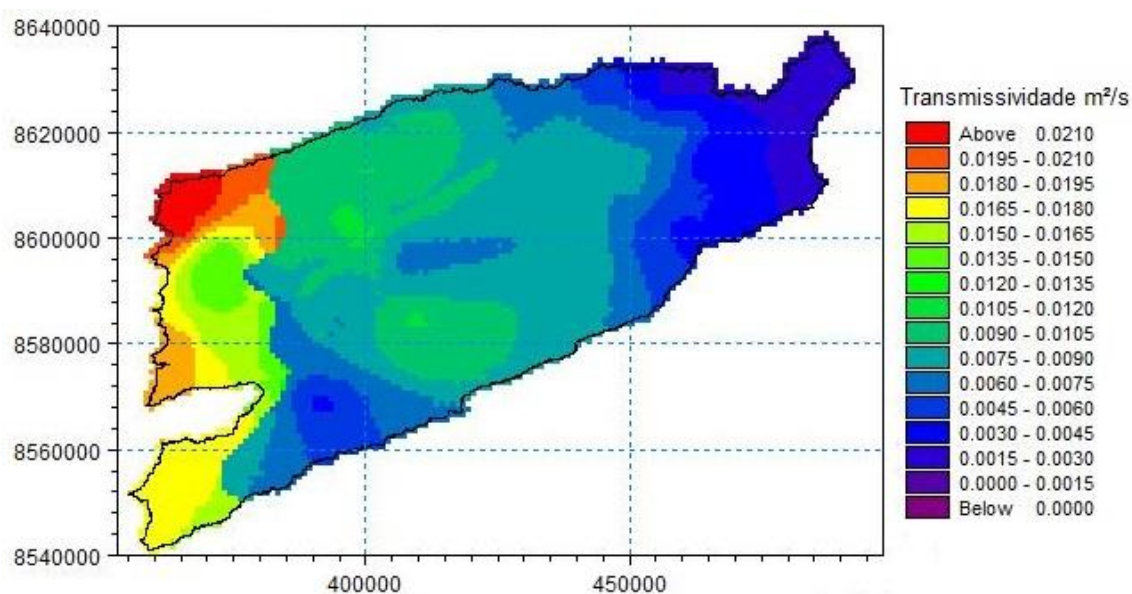
A definição das condutividades hidráulicas dos três tipos de aquíferos presentes na área modelada foi baseada nos dados da bibliografia. Por exemplo, segundo a ANA (2013,b), os valores de K no Aquífero Urucuia são geralmente superiores  $2.3 \times 10^{-5}$  m/s, no modelo numérico regional executado pelo autor foi adotado K uniforme de  $6.0 \times 10^{-5}$  m/s. Além disso, também utilizou-se de retroanálise dos resultados gerados a cada tentativa de calibração, chegando aos valores calibrados como mostra a Tabela 6. Para o Aquífero Semi-confinado foi atribuída a condutividade hidráulica de  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s, para o Aquífero Livre Raso atribuiu-se  $K = 2.2 \times 10^{-5}$  m/s, e para o Aquífero Livre Profundo tem-se  $K = 4.5 \times 10^{-5}$  m/s.

Tabela 6 - Propriedades hidrodinâmicas calibradas no regime permanente.

<b>Aquífero</b>	<b>K Vertical (m/s)</b>	<b>K Horizontal (m/s)</b>
Aquífero Livre Profundo	$4.5 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-5}$
Aquífero Livre Raso	$2.2 \times 10^{-5}$	$2.2 \times 10^{-5}$
Aquífero Semi-confinado	$2.5 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$

Na Figura 46 observa-se o mapa de transmissividade do Aquífero Urucuia na bacia do Rio das Fêmeas, utilizando os dados inseridos e calibrados no modelo.

Figura 46 - Mapa de transmissividade do Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas calibrada no modelo numérico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que o módulo fluxo em canais do MIKE SHE não foi utilizado neste trabalho devido tanto à ausência de dados requeridos neste pacote quanto à disponibilidade de tempo para o desenvolvimento de habilidades específicas para o seu uso. Neste caso, os rios foram representados como uma condição de contorno do tipo carga especificada, a qual permite apenas a extração de água. Se o nível d'água na célula cair para abaixo do nível de referência, então essa condição de contorno é desligada. A carga calibrada no regime permanente foi de 2 metros abaixo da superfície do terreno para cada célula.

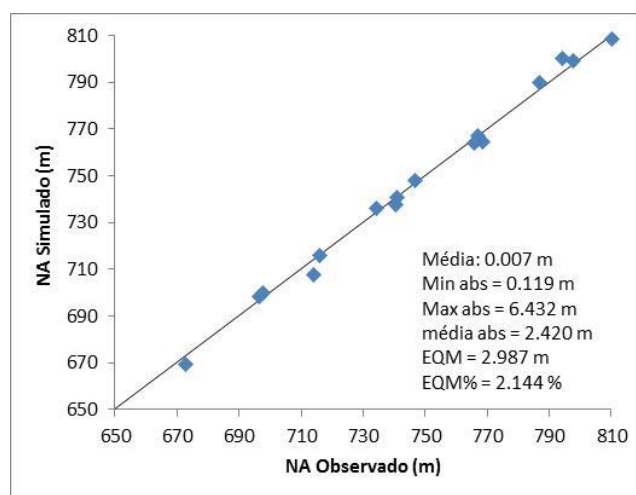
A Tabela 7 apresenta os poços de monitoramento utilizados na calibração do modelo em regime permanente e as respectivas médias dos NA monitorados no ano de 2012. Além disso, é possível visualizar os valores de NA calibrados e a diferença entre os dois valores (Na calculado – NA monitorado). A relação entre os níveis d'água subterrânea calculados e monitorados pode ser observada também no gráfico da Figura 47.

A aproximação dos níveis d'água subterrânea calculados e monitorados indicam uma boa calibração do modelo em regime permanente. A média absoluta de diferença entre os valores foi de 2.4 metros, o coeficiente de correlação foi de 0.997 e o erro normalizado foi de 2.1%.

Tabela 7 - Resultados de cargas hidráulicas simuladas versus observadas (médias de 2012) para os poços de monitoramento utilizados na calibração em regime permanente.

Poço de Monitoramento	NA médio - 2012 - (m)	NA Simulado (m)	Simul - Obs
2900020675	746.53	747.92	1.3878
2900020681	768.07	764.73	-3.3376
2900020682	715.79	715.66	-0.1330
2900020683	766.58	766.88	0.3013
2900020684	672.29	669.56	-2.7307
2900020685	696.03	698.18	2.1541
2900020687	793.85	800.41	6.5621
2900021797	765.38	764.20	-1.1773
2900021798	786.55	789.65	3.0957
2900021800	740.73	740.96	0.2287
2900024872	713.73	707.57	-6.1612
2900024873	740.06	737.44	-2.6239
2900024874	697.24	699.96	2.7185
2900024880	809.91	808.60	-1.3110
2900024881	797.48	799.40	1.9198
2900024882	733.98	736.31	2.3315

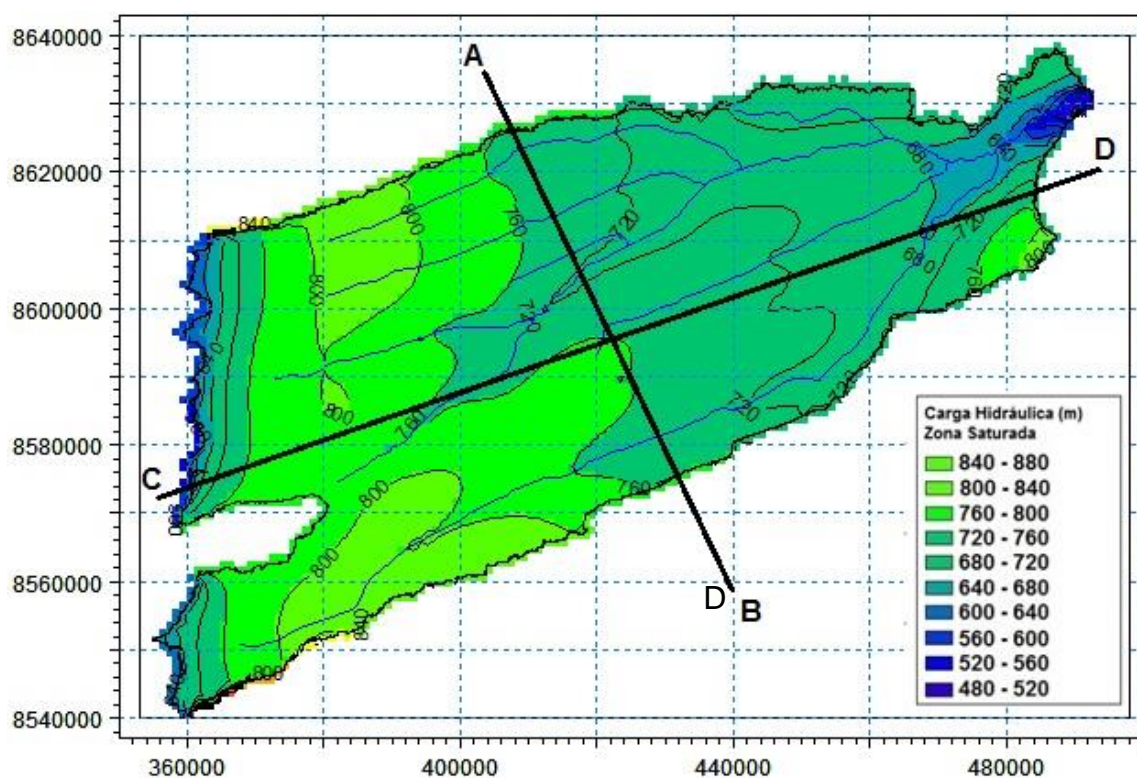
Figura 47 - Gráfico de calibração dos níveis d'água em regime permanente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

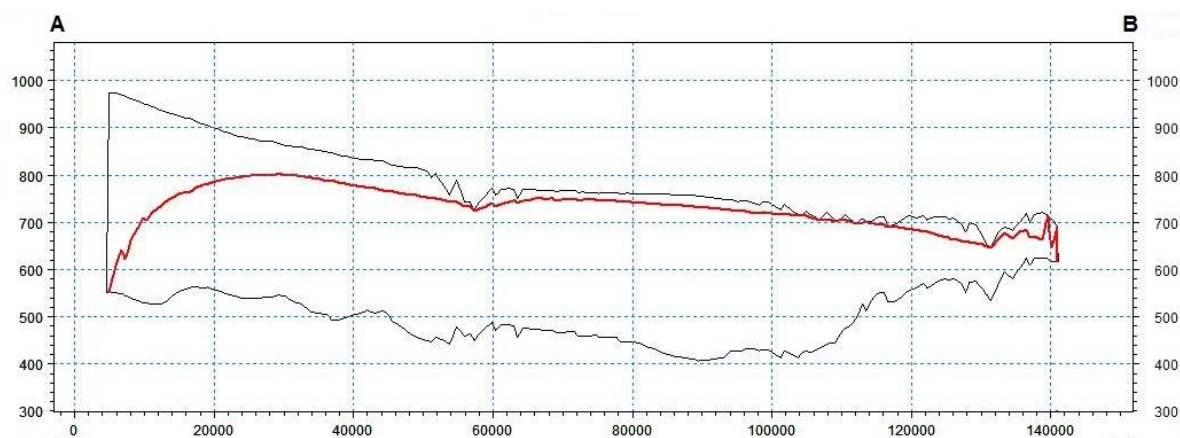
A Figura 48 apresenta a superfície equipotencial do nível d'água gerada para a calibração em regime permanente. Na extremidade Sudeste da bacia há uma região cujo nível d'água calculado permaneceu muito elevado, apesar dos melhores esforços para reduzir o erro nessa área. Na Figura 49 e Figura 50 observa-se dois perfis verticais SW-NE (A-B) e NW-SE (C-D) indicando o topo e base do Aquífero Urucuia e o posicionamento do nível d'água subterrânea calibrado.

Figura 48 - Superfície equipotencial do nível d'água para o ano de 2012 – Calibração em permanente.



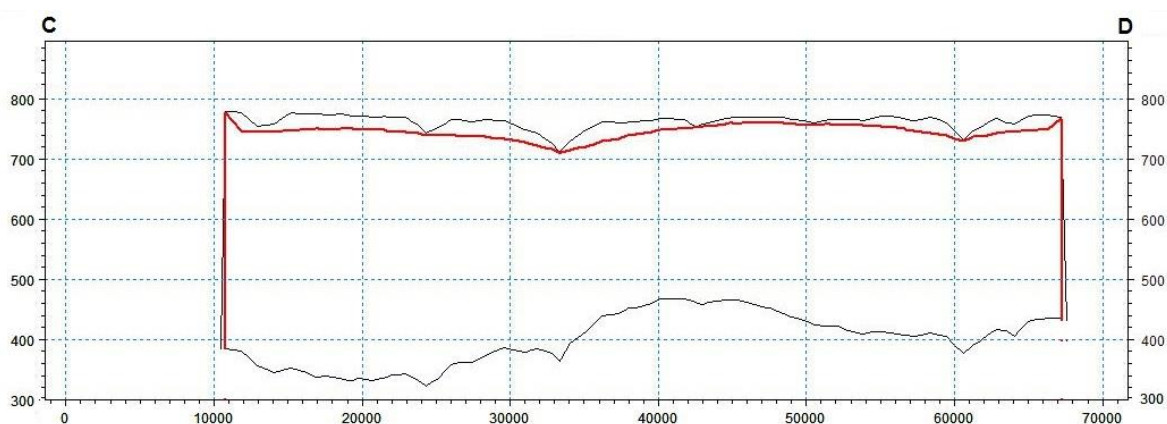
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49 – Perfil A-B (SW-NE) mostrando a superfície do NA calibrada em regime permanente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Perfil C-D (NW- SE) mostrando a superfície do NA calibrada em regime permanente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe ressaltar também a necessidade de cautela na análise dos níveis gerados no limite oeste, já que só há dois poços de monitoramento nesta área e por isso os níveis são inferidos.

Outro indicativo de uma boa calibração do modelo numérico é o balanço de massa, o qual é apresentado na Tabela 8. A vazão dos drenos calculada pelo modelo, para o período do ano de 2012, foi de 31.46 m<sup>3</sup>/s, que representa 80% do



que foi calculado no modelo conceitual utilizando os dados históricos (1976-2015), 39.47 m<sup>3</sup>/s. Essa diferença é minimizada se for levado em consideração que 2012 foi um ano com pluviometria abaixo da média o que provavelmente acarretou diminuição no escoamento de base dos rios. A recarga calculada pelo modelo foi de 205.53 mm/ano, a qual está dentro do intervalo estimado no modelo conceitual que é de 174 mm a 294 mm. Quanto ao fluxo que sai da bacia hidrogeológica oeste para a bacia do Rio Paranã, o resultado encontrado foi de 10.8 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 8 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno – regime permanente.

Parâmetro	Fluxo (mm/ano)	Fluxo (m <sup>3</sup> /s)
Recarga	205.53	42.25
Saída Cargas Fixas Oeste	-52.64	-10.8
Drenos	-153.03	-31.46
Total	-0.14	-0.01

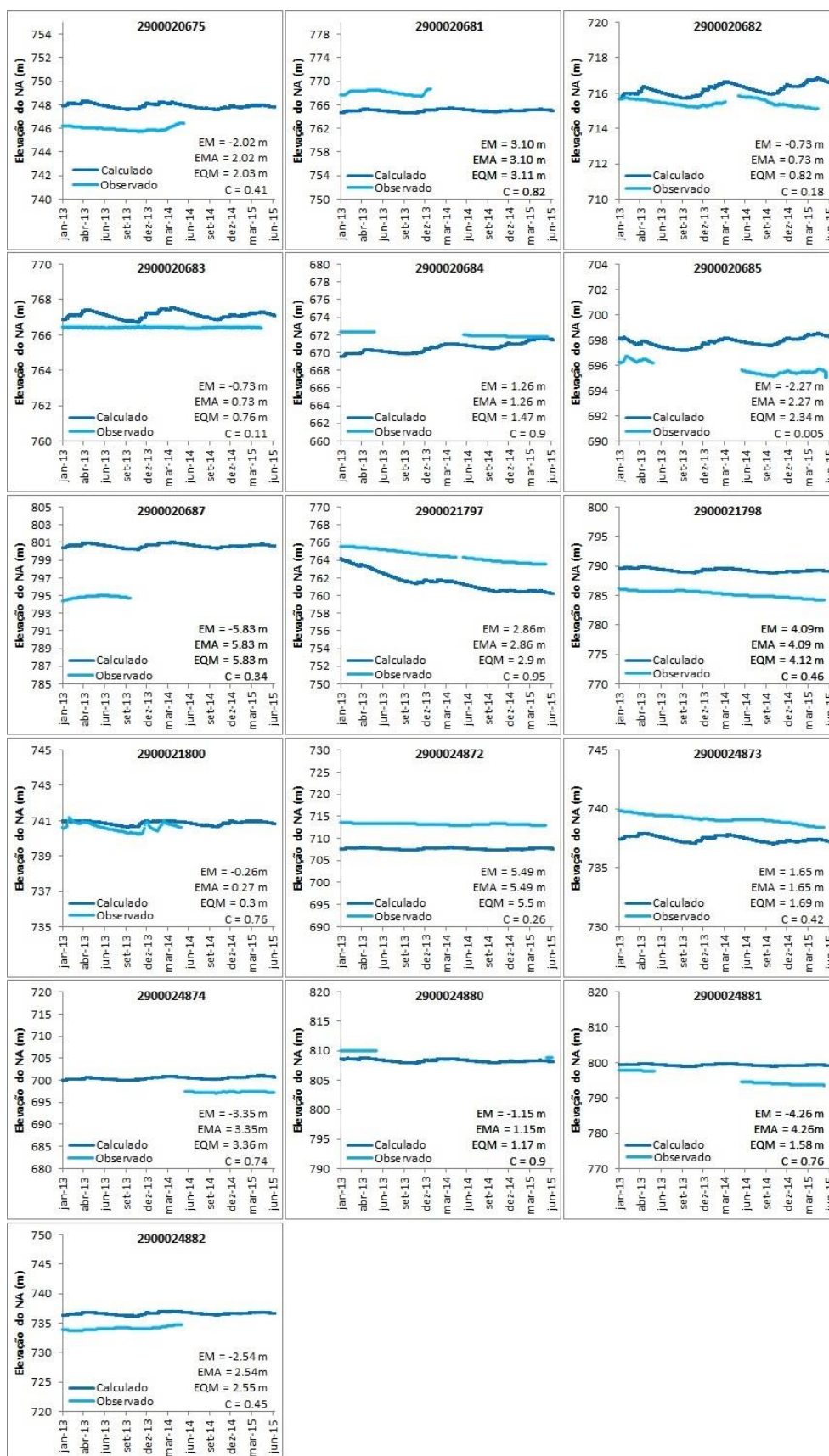
### 5.3.2 Calibração em regime transiente

Não houve grandes alterações dos parâmetros de calibração em regime permanente para o regime transiente. A recarga foi mantida como 22% da pluviometria medida nas 5 estações consideradas no estudo, com a diferença de que foram incluídos os dados diários de chuva para o período de calibração que foi de Jan/2013 a Jun/2015. As cargas fixas atribuídas à borda oeste da bacia e as condutividades hidráulicas permaneceram com os mesmos valores calibrados no regime permanente (Tabela 5 e Tabela 6). As cargas hidráulicas dos drenos também permaneceram como 2 metros abaixo da superfície do terreno. Quanto ao coeficiente de armazenamento, que no regime transiente é inserido no modelo, o valor calibrado foi de 10<sup>-4</sup> m<sup>-1</sup>. Já a carga hidráulica inicial (*initial head*) aplicada para a calibração em regime transiente foi a superfície potenciométrica calibrada no permanente (2012).

Ao todo 163 poços de bombeamento foram inseridos no modelo, conforme mencionado na metodologia. Como a vazão dos poços foi considerada como 0.011 m<sup>3</sup>/s, tem-se o fluxo total de 1.8 m<sup>3</sup>/s extraídos do modelo por meio da exploração pelos poços.

Na Figura 51 podem ser visualizados os gráficos de calibração dos níveis d'água subterrânea em regime transiente. Notam-se algumas discrepâncias entre os níveis calculados e os observados, mesmo mediante o empenho para diminuir estas diferenças. O maior erro médio quadrático foi de 5.83 metros o que está dentro do aceitável para a escala do modelo.

Figura 51 - Gráfico de calibração dos níveis d'água em regime transiente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao balanço de massa, os resultados também são indicativos da boa calibração do modelo e são apresentados na Tabela 9. Verifica-se que no ano de 2013 a recarga calculada foi de 283.73 mm e o fluxo médio nos drenos totalizou 33.16 m<sup>3</sup>/s. Em 2014, provavelmente em função da redução pluviométrica, esses valores diminuíram para 218.06 mm de recarga e 32.72 m<sup>3</sup>/s nos drenos. Já em 2015, como foram calibrados 6 meses e não 1 ano, a recarga calculada foi de 120.06 mm e a vazão média dos cursos d'água foi estimada como sendo 33.58 m<sup>3</sup>/s. A vazão extraída pelos poços foi constante de 1.8 m<sup>3</sup>/s ao longo do período de calibração. Na borda oeste o fluxo médio que sai do aquífero foi calculado em 10.67 m<sup>3</sup>/s, 10.64 m<sup>3</sup>/s e 10.53 m<sup>3</sup>/s respectivamente para os anos de 2013, 2014 e 2015.

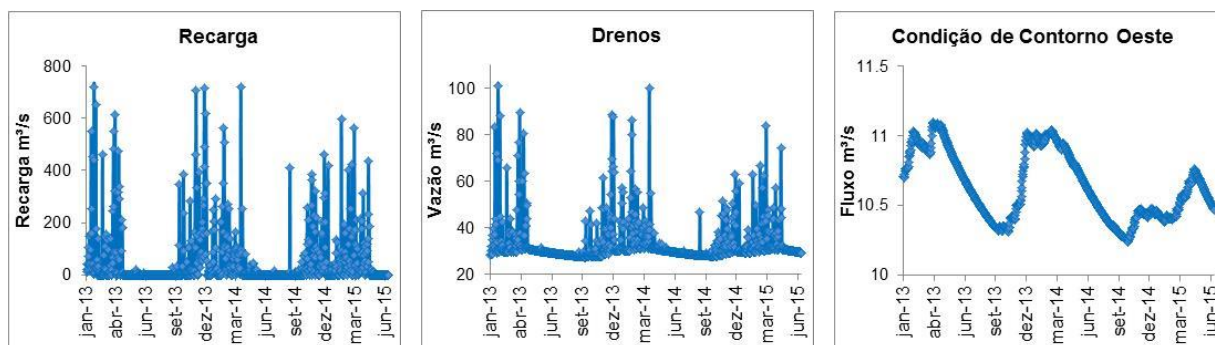
Na Figura 52 constam os gráficos com as séries históricas de recarga, vazão nos drenos e saída oeste calculadas pelo modelo durante o período de calibração no regime transiente. É possível verificar a excelente correlação no tempo das respostas dos drenos e saída oeste em relação às recargas utilizadas.

A Figura 53 apresenta a superfície equipotencial do nível d'água gerada para o final da calibração em regime transiente, em 30/06/2015. Os níveis d'água subterrânea calibrados na borda sudeste da bacia estão mais elevados do que a superfície do terreno. No regime permanente também ocorreu este fato. Por isso, recomenda-se que nos estudos futuros seja dada mais ênfase a esta área já que utilizando o conhecimento disponível não foi possível chegar a um resultado mais adequado.

Tabela 9 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno e por ano – regime transiente.

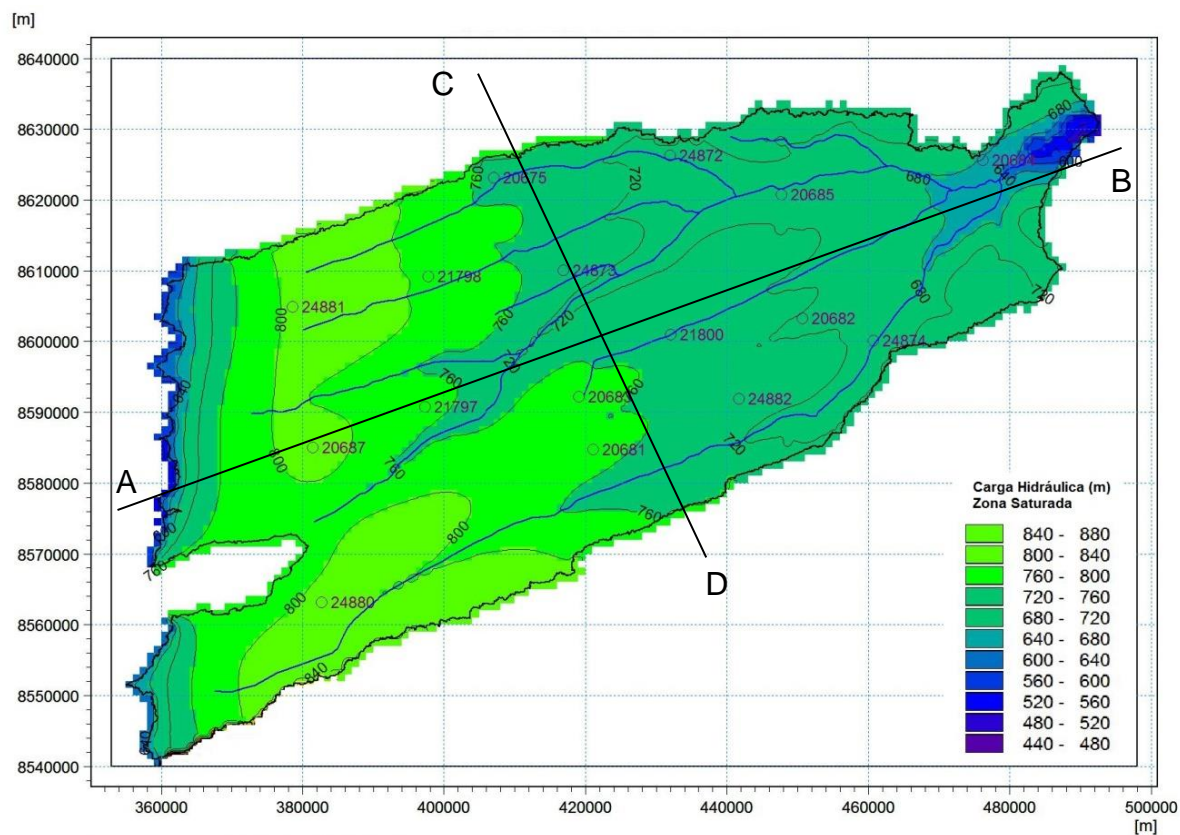
Início	Fim	Dias	Recarga (mm)	Recarga (m <sup>3</sup> /s)	Varição do Armazenamento (superficial) (m <sup>3</sup> /s)	Varição do Armazenamento (subterrâneo) (m <sup>3</sup> /s)	Saída Oeste (m <sup>3</sup> /s)	Poços (m <sup>3</sup> /s)	Drenos (m <sup>3</sup> /s)	Erro
01/01/13	31/12/13	365	283.73	57.68	-7.45	-4.64	- 10.67	-1.8	-33.16	0.002033
01/01/14	31/12/14	365	218.06	44.33	-3.43	4.22	- 10.64	-1.8	-32.72	0.000000
01/01/15	30/06/15	181	120.06	49.22	-3.30	-0.04	- 10.53	-1.8	-33.58	0.000410

Figura 52 - Valores calculados para a recarga, vazão nos cursos d'água e fluxo na borda oeste da Bacia do Rio das Fêmeas durante o período de calibração em regime transiente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

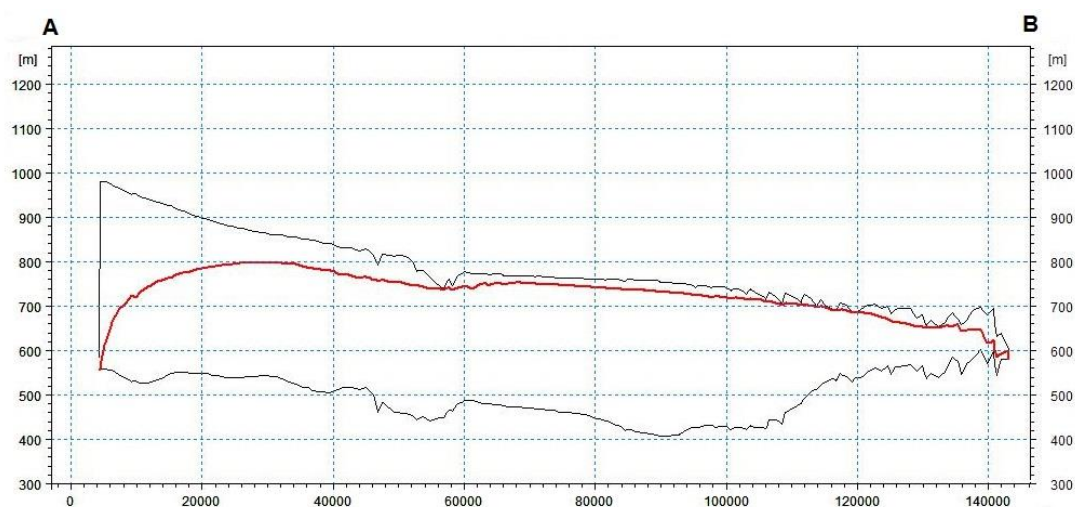
Figura 53 - Superfície equipotencial do nível d'água simulada para o final da calibração em transiente (30/06/2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

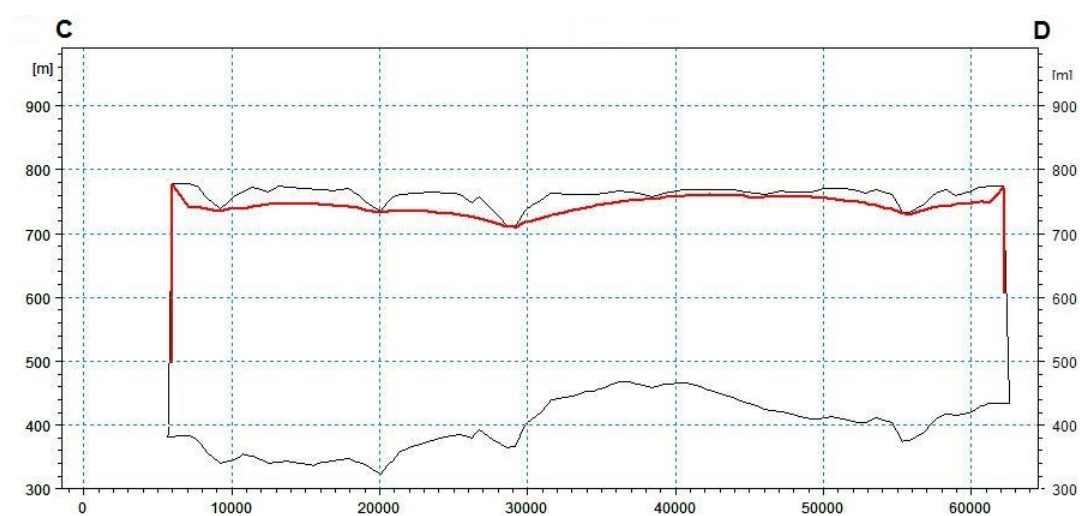
Na Figura 54 e Figura 55 é possível observar dois perfis verticais SW-NE (A-B) e NW-SE (C-D) indicando o topo e base do Aquífero Urucuia e o posicionamento do nível d'água subterrânea no final da calibração em regime transiente.

Figura 54 - Perfil A-B (SW-NE) mostrando a superfície do NA para o final da calibração em regime transiente (30/06/2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Perfil C-D (NW-SE) mostrando a superfície do NA para o final da calibração em regime transiente (30/06/2015).



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.3 Simulações

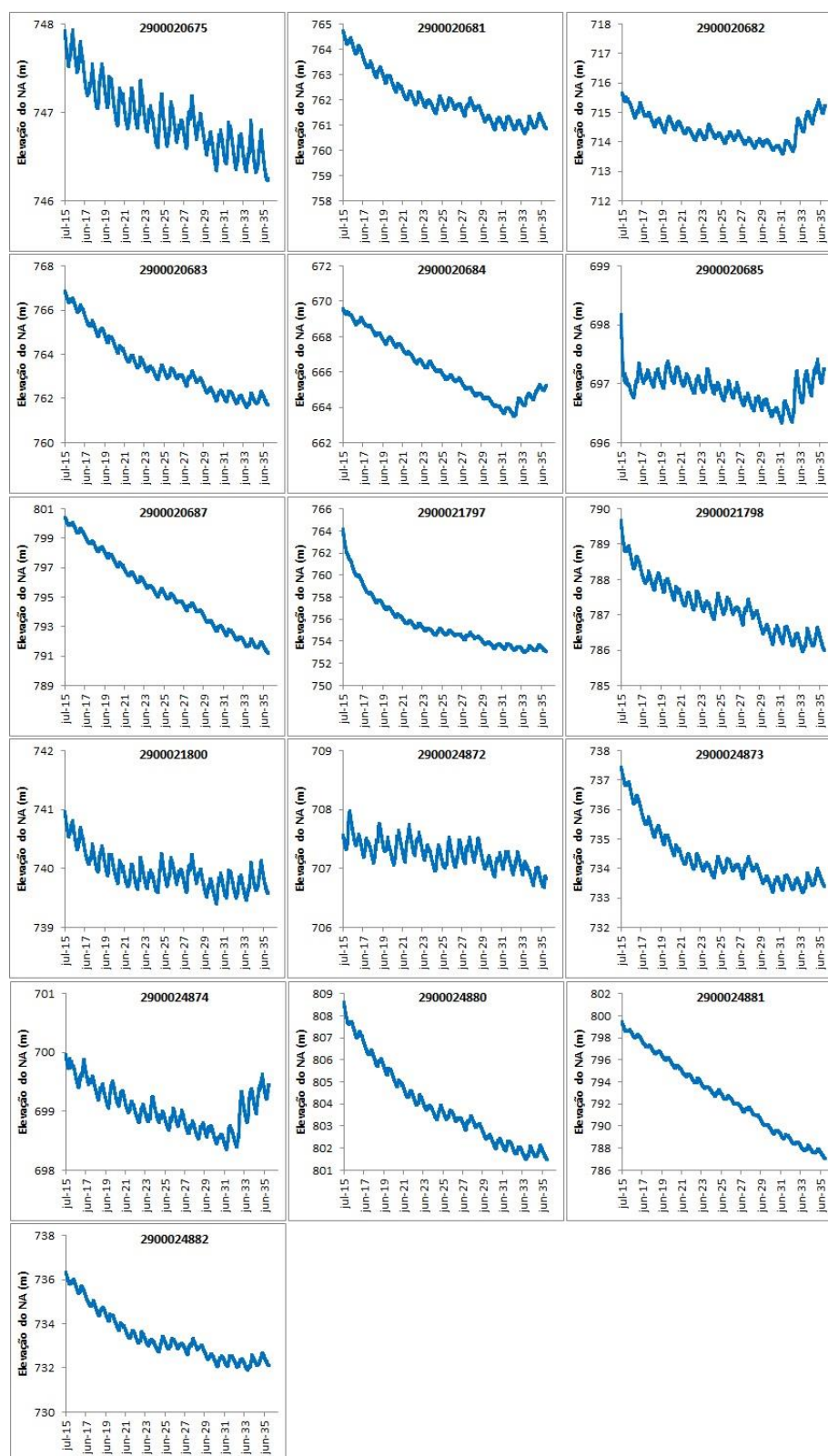
O período de simulação foi de 20 anos de 01/07/2015 a 31/12/2035. O cenário simulado foi de aumento de 1% por ano das vazões extraídas pelos poços e redução de 50% da pluviometria a partir de 2016, tendo como consequência a redução na recarga.

Na Figura 56 observa-se o comportamento dos níveis d'água subterrânea ao longo dos anos de simulação.

Verifica-se redução média do NA de 5 metros de profundidade, variando de 1.3 metros no poço 2900024872 a 12.4 m no poço 2900024881.

Na Tabela 10 apresenta-se o balanço de massa dos 20 anos de simulação. Como principal consequência do cenário de redução acentuada de recarga simulado, aliado ao aumento de extração por bombeamento, verifica-se uma redução de 25% no fluxo de base dos cursos d'água, sendo uma consequência direta na potencialidade hídrica da bacia. Também é possível observar a diminuição de 18% do fluxo da saída oeste.

Figura 56 - Gráficos de variação dos níveis d'água no período de simulação de Jul/2015 a Dez/2035.



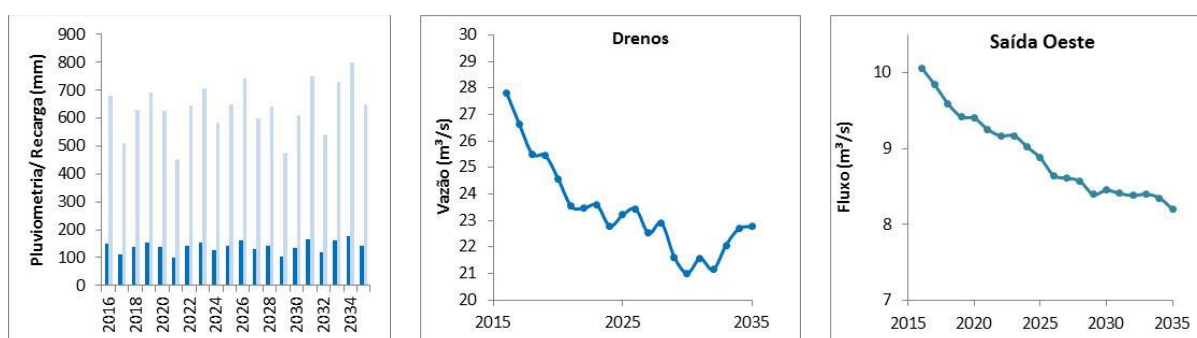
Fonte: Elaborado pelo autor.



Tabela 10 - Resultados do balanço de massa por condição de contorno e por ano durante a simulação (2015-2035).

Ano	Recarga (mm)	Varição do Armazenamento (superficial) (m <sup>3</sup> /s)	Varição do Armazenamento (subterrâneo) (m <sup>3</sup> /s)	Saída Oeste (m <sup>3</sup> /s)	Poços (m <sup>3</sup> /s)	Drenos (m <sup>3</sup> /s)
2016	149.45	2.38	-11.77	10.07	1.79	27.83
2017	111.53	1.78	-17.36	9.84	1.79	26.62
2018	138.45	1.03	-9.80	9.60	1.81	25.51
2019	151.97	0.80	-6.61	9.42	1.83	25.45
2020	137.27	0.71	-8.71	9.40	1.85	24.57
2021	98.76	0.34	-14.93	9.26	1.86	23.54
2022	141.31	0.25	-6.05	9.17	1.88	23.47
2023	155.57	0.36	-3.39	9.17	1.90	23.58
2024	128.31	0.41	-8.14	9.02	1.92	22.80
2025	142.61	0.18	-5.21	8.88	1.94	23.21
2026	162.95	0.33	-1.25	8.65	1.95	23.44
2027	131.59	0.12	-6.48	8.61	1.97	22.53
2028	140.92	0.05	-4.95	8.57	1.99	22.91
2029	104.44	0.17	-10.97	8.39	2.01	21.62
2030	134.15	0.01	-4.24	8.45	2.03	21.02
2031	164.70	0.14	1.31	8.41	2.04	21.58
2032	118.93	0.14	-7.62	8.38	2.06	21.15
2033	160.66	0.71	-0.61	8.40	2.08	22.08
2034	175.22	0.66	1.81	8.35	2.10	22.70
2035	142.10	0.66	-4.87	8.20	2.12	22.78

Figura 57 - Valores calculados para a recarga, vazão nos cursos d'água e fluxo na borda oeste da Bacia do Rio das Fêmeas durante o período de simulação (2015-2035).



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida entre os anos de 2015 e 2017, no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, e teve como objetivo avaliar uma metodologia para a determinação da dinâmica de fluxo e a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, baseada na implantação de um modelo hidrológico integrado, tendo sido aplicado na Bacia do Rio das Fêmeas, Aquífero Urucuia. Como principais conclusões do trabalho executado podemos citar:

- i. A avaliação dos dados hidroclimatológicos indicaram a tendência de redução dos recursos hídricos tanto superficiais quanto subterrâneos nos últimos anos. Verificou-se que a precipitação pluviométrica anual tem permanecido abaixo da média (1174.82 mm/ano - 1972 a 2016) nos últimos anos. Também ficou clara a redução do fluxo no exutório da bacia ao longo dos anos, tanto é que desde o ano 2000 as vazões estão abaixo da média histórica (48 m<sup>3</sup>/s - 1984-2011). E ainda percebeu-se a tendência, embora suave, de rebaixamento do NA em mais da metade dos poços monitorados.
- ii. De acordo com modelo hidrogeológico conceitual elaborado neste trabalho, o Aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas apresenta um sistema hidrogeológico predominantemente homogêneo, no entanto algumas mudanças estruturais e intercalações de níveis silicificados conferem alterações físicas que permitem diferenciar as unidades hidrogeológicas: (1) Aquífero Livre Regional; (2) Aquífero Livre Profundo e (3) Aquífero Semi-confinado. A área delimitada pela bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas comporta duas bacias hidrogeológicas, a bacia hidrogeológica leste contribui com fluxo de base para a alimentação da bacia do Rio Grande, enquanto que a bacia hidrogeológica oeste contribui para as drenagens da bacia do Rio Tocantins. O fluxo regional d'água subterrânea na bacia hidrogeológica leste é para NE e localmente na direção dos cursos

d'água. Na bacia hidrogeológica oeste apenas dois poços indicam o fluxo d'água subterrânea para SW. Estimou-se que a recarga na região varia de 15% a 25% da pluviometria. O fluxo de base médio que sai do Aquífero Urucua, na área de estudo, para contribuir com as vazões dos rios foi avaliado em 39.5 m<sup>3</sup>/s, isto equivale a 194.7 mm/ano ou 16% da pluviometria. A estimativa de evapotranspiração é de 917 mm a 972 mm. E a vazão captada pelos poços de bombeamento foi calculada em 1.8 m<sup>3</sup>/s.

- iii. O modelo numérico MIKE SHE foi aplicado à área de estudo. Dos cinco módulos disponíveis para a simulação dos processos do ciclo hidrológico, foi utilizado apenas o módulo de água subterrâneas. Isso fez com que os resultados obtidos fossem muito semelhantes aos que seriam gerados se utilizado outro modelo apenas para água subterrânea, como, por exemplo, o MODFLOW. Os outros módulos não foram utilizados tanto pela dificuldade para a aquisição dos dados de entrada, como por falta de tempo para o desenvolvimento de habilidade necessárias para utilizar um modelo de tal complexidade. Através do trabalho executado, ficou claro que a elaboração de um modelo com integração entre águas superficiais e subterrâneas exige a participação de uma equipe multidisciplinar formada, pelo menos, por hidrogeólogos e hidrólogos.
- iv. O Modelo Numérico foi calibrado tanto em regime permanente (2012) quanto em regime transiente (2013-2015). A recarga calibrada foi de 22% da pluviometria. Para o Aquífero Semi-confinado foi atribuída a condutividade hidráulica de  $2.5 \times 10^{-5}$  m/s, para o Aquífero Livre Raso atribuiu-se  $K = 2.2 \times 10^{-5}$  m/s, e para o Aquífero Livre Profundo tem-se  $K = 4.5 \times 10^{-5}$  m/s. O coeficiente de armazenamento, inserido no transiente, foi calibrado em  $10^{-4}$  m<sup>-1</sup>. No regime permanente a média absoluta de diferença entre os NA calculados e monitorados foi de 2.4 metros, o coeficiente de correlação foi de 0.997 e o erro normalizado foi de 2.1%. Na calibração em regime transiente o maior erro médio quadrático foi

de 5.83 metros o que está dentro do aceitável para a escala do modelo. Com relação ao balanço de massa, tanto para o permanente quanto para o transiente, os resultados também são indicativos da boa calibração do modelo. Cabe ressaltar a necessidade de cautela na análise dos níveis gerados no limite oeste, já que não há poços de monitoramento nesta área e por isso os níveis são inferidos.

- v. O cenário de simulação desenvolvido para um período de 20 anos (2015-2035), mostrou que a redução da pluviometria em 50%, a partir de 2016, e o aumento de 1% por ano das vazões extraídas pelos poços de bombeamento ocasionam a redução na recarga dos aquíferos, a diminuição de 25% no fluxo de base dos cursos d'água, a diminuição de 18% do fluxo da saída oeste e a redução média do NA de 5 metros de profundidade, variando de 1.3 a 12.4 metros.
- vi. O modelo implementado, mesmo ainda não incluindo todas as potencialidades dos outros módulos do software MIKE SHE, pode ser utilizado para a simulação de cenários para obter indicativos dos efeitos nas águas superficiais e subterrâneas de diversos fatores relacionados ao ciclo hidrológico, tais como alterações na recarga e nas extrações por poços de bombeamentos.
- vii. Diante das conclusões expostas, as recomendações são:
  - I. Que nos estudos futuros seja dada mais ênfase a área sudeste da Bacia do Rio das Fêmeas, onde não houve boa calibração do NA. Mesmo utilizando todo o conhecimento disponível não foi possível chegar a um resultado mais adequado.
  - II. Recomenda-se o adensamento da rede de monitoramento d'água subterrânea na bacia hidrogeológica oeste.
  - III. Abordar a interação ASub-ASup sob o ponto de vista multidisciplinar e em várias escalas, agregando técnicas de análises de campo e sensoriamento remoto com modelagem numérica e análises estatísticas.

- IV. Implementar os demais módulos do software MIKE SHE para o modelo da área de estudo desenvolvido a fim de se obter um modelo mais integrado de todo o ciclo hidrológico, permitindo expandir o uso do modelo para aplicações que envolvam outros fatores, tal como o efeito nos níveis dos aquíferos de extrações diretamente dos cursos d'água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKRAM, F.; RASAUL, M. G.; KHAN, M.M.K.; AMIR, M.S.I.I. A Comparative view of groundwater flow simulation using two modelling software - MODFLOW and MIKE SHE. In: **18<sup>th</sup> AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE**, Launceston, Australia, p. 811-815, 2012.

ALBUQUERQUE, A. C. L. S. ***Estimativa de recarga da Bacia do rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos***. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ALBUQUERQUE, A. C. L. S.; CHAVES, H. M. L. Estimativa de recarga da bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n.11, p.1123–1129, 2011.

AMORIM JÚNIOR, V.; LIMA, O. A. L. Aquífero Urucuia: uma avaliação hidrogeológica integrando resistividade e polarização induzida no domínio do tempo. IN; INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8. , 14-18 Sep. 2003, Rio de Janeiro. **Technical papers**. Rio de Janeiro: SBGF, 2003. 1 CD-ROM. Paralelamente Latin American Geophysical Conference, 5.

AMORIM JÚNIOR, V.; LIMA, O. A. L. Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas - BA Usando Resistividade e Polarização Elétrica Induzida. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 2, p. 117–129, 2007.

AMORIM JUNIOR, V. ***Avaliação hidrogeológica do aquífero Urucuia na Bacia do Rio das Fêmeas usando IP-Resistividade***. 2003. 82 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Consórcio Engecorps - Walm . ***Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada e compartilhada***. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2013a. v.1

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Consórcio Engecorps - Walm - ***Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão Integrada e compartilhada***. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2013b. v.3

ANDERSON, M. P. Heat as a ground water tracer. **Groundwater**, v. 43, n. 6, p. 951–968, 2005.

ANIBAS, C. et al. A hierarchical approach on groundwater-surface water interaction in wetlands along the upper Biebrza River, Poland. **Hydrology and Earth System**

**Sciences Discussions**, v. 8, p. 9537–9585, 2011.

BALLEAU, W. P. Water appropriation and transfer in a general hydrogeologic system. **Natural Resources Journal**, v.28, p. 269-291, 1988.

BARTHEL, Roland; BANZHAF, Stefan. Groundwater and surface water interaction at the Regional-scale – A Review with Focus on Regional Integrated Models. **Water Resources Management**, v.30, n. 1, p.1-32, 2016.

BECKER, M. W. Potential for satellite remote sensing of groundwater. **Groundwater**, v. 44, n. 2, p. 306–318, 2006.

BONFIM, L. F.; GOMES, R. A. D. Aquífero Urucuia – geometria e espessura: ideias para discussão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUAS SUBTERRANEAS, 13, 19-22 out, Cuiabá. **Anais**. Cuiabá: ABAS, 2004. 1 CD-ROM.

BOUWER, H.; MADDOCK, T. Making sense of the interactions between groundwater and Streamflow: Lessons for Water Masters and Adjudicators. **Rivers**, v. 6, n. 1, p. 19–31, 1997.

BRUNNER, P.; SIMMONS, C. T. HydroGeoSphere: a fully Integrated, physically based hydrological model. **Groundwater**, v. 50, n. 2, p. 170–176, 2012.

CAMBARERI, T. C.; EICHNER, E. M. Watershed delineation and groundwater discharge to a coastal embayment. **Groundwater**, v. 36, n. 4, p. 626–634, 1998.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENE, M. A. Origem e Evolução Tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 283–294, 1997.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269–282, 1997.

Camp Dresser & McKee Inc. - CDM. **Evaluation of Integrated Surface Water and Groundwater Modeling Tools**. . [S.l.], 2001.

CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrogeology**. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1997. 325p.

CONANT, B. Delineating and quantifying groundwater discharge zones using streambed temperatures. **Groundwater**, v. 42, n.2, p. 243–257, 2004.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: Sistema de Informações Geográficas - SIG**. [Geology and mineral resources of the Bahia State: Geographic Information System - GIS]. Salvador: CPRM, **2003**. Escalas 1:1.000.000; 1:2.000.000. 1 CD-ROM. Versão 1.1.

DHI. MIKE SHE User Manual. Volume 2: reference guide. v. 2, p. 386, 2007.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and chemical hydrogeology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, c1998. 506 p.

- DONIGIAN, A. S.; BICKNELL JR., B. R. Hydrological Simulation Program – FORTRAN (HSPF). In: SINGH, Vijay P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources, 1995. p. 395–442.
- DOUMMAR, J.; SAUTER, M.; GEYER, T. Simulation of flow processes in a large scale karst system with an integrated catchment model (Mike She) - Identification of relevant parameters influencing spring discharge. **Journal of Hydrology**, v. 426-427, p. 112–123, 2012.
- FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598 p.
- FLECKENSTEIN, J. H. et al. River-Aquifer Interactions , geologic heterogeneity , and Low-Flow Management. **Groundwater**, v. 44, n. 6, p. 837–852, 2006.
- FRANA, A. S. **Applicability of MIKE SHE to simulate hydrology in heavily tile drained agricultural land and effects of drainage characteristics on hydrology**. 2012. 138 f. Dissertação (Master of Science) - Iowa State University, Iowa, 2012.
- GASPAR, M. T. P. **Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização regional e propostas de gestão**. 2006. 204 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- GÓES, V. C. **Simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada ao geoprocessamento para avaliação da macrodrenagem em centros urbanos**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- GONZÁLEZ-PINZÓN, R. et al. A field comparison of multiple techniques to quantify groundwater – surface-water interactions. **Freshwater Science**, v. 34, n.1, Aug. 2014, 2015.
- GRAHAM, D. N.; BUTTS, M. B. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE. In: SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. (Ed.). **Watershed models**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. p. 245-272.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 91–109, 2002.
- HEPPNER, C. S.; NIMMO, J. R. A Computer Program for Predicting Recharge with a Master Recession Curve. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Reports 5172. 2005.
- HUBER, W.A.; DICKINSON, R.E. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. EPA Environmental Research Laboratory. [S.l.: s.n.], 1988
- HUGHES, J. D.; LIU, J. MIKE SHE: Software for integrated surface water/ground water modeling. **Groundwater**, v. 46, n. 6, p. 797–802, 2008.



IBGE. **Mapa de clima do Brasil**. [S.l: s.n.], 2002. Escala 1:5.000.000

KAISER, C.; DIERSCH, H. -J. G.; GRÜNDLER, R. **Coupling groundwater models to external simulation modules: strategies and application to surface waters**. Zurich, Switzerland: International Association of Hydrological Sciences Publication Nº.265. Wallingford, Oxfordshire, 2000.

KALBUS, E; REINSTORF, F; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.10, p. 873-887, 2006.

KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson et al. **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 113-138. il. color. ISBN 8586238147.

KIANG, C. H.; SILVA, F. P. Contribuição ao Arcabouço geológico do Sistema Aquífero Urucuia. **Geociências - UNESP**, v. 34, n. 4, p. 872–882, 2015.

KOLDITZ, O. *et al.* OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. **Environmental Earth Sciences**, v.67, n. 2, p. 589-599, 2012.

LABAUGH, J. W; ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C. Groundwater contribution to the water and chemical budgets of Williams Lake, Minnesota, 1980–1991. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**, v. 52, p. 754–767, 1995.

LARKIN, R. G.; SHARP, J. M. On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and groundwater flow direction in alluvial aquifers. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, p. 1608–1620, 1992.

LEE, D. R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. **Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 1, p. 140–147, 1977.

LEE, T. M.; SWANCAR, A. Influence of evaporation, groundwater, and uncertainty in the hydrologic budget of Lake Lucerne, a seepage lake in Polk County, Florida. **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2439**, Open-File Rep 93:26, 1994.

LEVY, J.; XU, Y. Review: Groundwater management and groundwater/ surface-water interaction in the context of South African water policy. **Hydrogeology Journal**, v. 20, n. 2, p. 205–226, 2012.

LIMA, O. A. L. **Estudos Geológicos e Geofísicos do aquífero Urucuia na Bacia do Rio Cachorro - Oeste da Bahia**. Salvador: Publicação da SRH-BA e UFBA, 2000

LUCAS, A. A. T. **Impacto da Irrigação na Bacia Hidrográfica do Ribeirão dos Marins**. 2007. 102 f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MARKSTROM, S. L.; NISWONGER, R. G.; REGAN, R. S.; PRUDIC, D. E.; BARLOW, P. M. **GSFLOW—Coupled Ground-Water and Surface-Water Flow Model Based on the Integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005)**. U. S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240p. 2008.

MEINZER, O. E. **The occurrence of groundwater in the United States, with a discussion of principles**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, p. 489, 1923.

MONNINKHOFF, B. Coupling of the groundwater model FEFLOW with the hydrodynamic model MIKE11. **German - Chinese Conference Modern methods and instruments for water management and flood protection**. IWU-Tagungsberichte, p. 161–173, 2002.

NASCIMENTO, K. R. F. **Resumo Executivo - Uso Conjunto das Águas Superficiais e Subterrâneas da Sub-bacia do Rio das Fêmeas - BA**. Superintendência de Recursos Hídricos – Salvador/ BA, 40 p., 2003.

PANDAY, S.; HUYAKORN, P. S. A fully coupled physically based spatially distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, v. 27, n.4, p. 361–382, 2004.

PAPARRIZOS, S.; MARIS, F. *Hydrological simulation of Sperchios River basin in Central Greece using the MIKE SHE model and geographic information systems*. **Applied Water Science**, v. 7, n. 2, p. 591-599, 2017.

PASSO, D. P. et al. **Caracterização geomorfológica do município de São Desidério, BA, Escala 1:50.000**. Planaltina, DF: [s.n.], 2010.

PIMENTEL, A. L; AQUINO, R. F.; SILVA, R. C. A.; VIEIRA, C. M. B. Estimativa da recarga do Aquífero Urucuia na sub-bacia do Rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. in: **Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português**, Rio de Janeiro, [S.I.]: CD-ROM., p. 27-37, 2000

PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions : A review. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 4, p. 465–491, 2011.

PRUDIC, D. E.; KONIKOW, L. F.; BANTA, E. R. **A New Streamflow-Routing (SFR1) Package to Simulate Stream- Aquifer Interaction with MODFLOW-2000**. USGS, Carson City, Nevada, USA. [S.I: s.n.]. , 2004

PRYET, A.; LABARTHE, B.; SALEH, F.; AKOPIAN, M.; FLIPO, N. Reporting of Stream-Aquifer Flow Distribution at the Regional Scale with a Distributed Process-Based Model. **Water Resources Management**, v. 29, n. 1, p. 139–159, 2015.

PUCKETT, L. J.; COWDERY, T. K.; MCMAHON, P. B.; TORNES, L. H.; STONER, J. D. Using chemical, hydrologic, and age dating analysis to delineate redox processes and flow paths in the riparian zone of a glacial outwash aquifer-stream system. **Water Resources Research**, v. 38, n. 8, p. 9–1-9-20, 2002.

RAGAB, R.; BROMLEY, J.; DÖRFLINGER, G.; KATSIKIDES, S. IHMS-Integrated hydrological modelling system. Part 2. application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 19, p. 2681-2692, 2010.

RAGAB, R.; BROMLEY, J. IHMS-Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. Hydrological processes and general structure. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2663–2680, 2010.

RASSAM, D. W.; WERNER, A. **Review of groundwater–surfacewater interaction modelling approaches and their suitability for Australian conditions**. e-Water Technical Report, 2008.

REFSGAARD, J. C.; HØJBERG, A. L.; MØLLER, I.; HANSEN, M.; SØNDERGAARD, V. Groundwater modeling in integrated water resources management - Visions for 2020. **Groundwater**, v. 48, n. 5, p. 633–648, 2010.

REFSGAARD, J. C.; STORM, B. MIKE SHE. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resource Publications, Colorado, USA: [s.n.], 1995. p. 806–846.

RIESENAUER, A. E. Methods of solving problems of multidimensional, partially saturated steady flow in soils. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n.20, p. 5725–5733, 1963.

ROSENBERRY, D. O.; LABAUGH, J. W. **Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water**. U.S. Geological Techniques and Methods 4-D2, 128 p., 2008.

ROSS, M. A.; TARA, P.D.; GEURINK, J.S.; STEWART, M. T. **FIPR Hydrologic Model users manual and technical documentation**. Center for modeling hydrologic and aquatic systems. Tampa, Florida, University of South Florida, 1997.

SAAR, M. O. Review: Geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 1, p. 31–52, 2011.

SDI ENVIRONMENTAL SERVICES. **Water Resources Evaluation and Integrated Hydrologic Model of the Central Northern Tampa Bay Region**. Clearwater, Florida, 1997. (Relatório Técnico)

SGARBI, G. N.C.; SGARBI, P. B. A.; CAMPOS, J. E. G. C; DARDENE, M. A.; PENHA U. C. **Bacia Sanfranciscana: o registro Fanerozóico da Bacia do São**

Francisco. In: *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. p. 349.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 52–67, 2002.

SOPHOCLEOUS, M. A. Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: practical aspects. **Journal of Hydrology**, v. 124, p. 229–241, 1991.

SOPHOCLEOUS, M. A. et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. **Journal of Hydrology**, v. 214, n. 1-4, p. 179–196, 1999.

SOUZA, N. S.; CARDOSO, J. M. S.; SOUZA, W. J.; SANTOS, J. Y. G; SANTOS, P. S. Análise das características morfológicas e de susceptibilidade a enchentes da sub-bacia do Rio das Fêmeas, Oeste da Bahia com uso de Geotecnologias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR,17, João Pessoa-PB: **Anais**. João Pessoa: INPE, p. 1884-1891, 2015.

SPIGOLON, A. L. D.; ALVARENGA, C. J. Fácies e Elementos Arquiteturais Resultantes de Mudanças Climáticas em um Ambiente Desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 579–586, 2002.

SWAIN, E. D.; WEXLER, E. J. ***A coupled surface-water and ground-water flow model (MODBRANCH) for simulation of stream-aquifer interaction***. [S.l: s.n.], 1996. (U.S. Geological Survey)

TERRIEN, R.; MCLAREN, R. G.; SUDICKY, E. A.; PANDAY, S. M. **HydroGeoSphere: a Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport**. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Canadá, 2010. (Relatório Técnico)

THOMPSON, J. R. et al. Modelling the hydrological impacts of climate change on UK lowland wet grassland. **Wetlands Ecology and Management**, v. 17, n. 5, p. 503–523, 2009.

TIAN, Y.; ZHENG, Y.; WU, B.; WU, X.; LIU, J.; ZHENG, C. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. **Environmental Modelling & Software**, v. 63, p. 170–184, 2015.

TÓTH, J. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 16, p. 4785–4812, 1963.

TSCHIEDEL, W. M. ***Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da tectônica da Sub-Bacia Urucuia***. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Brasília, 76 p. 2004.

- VANDERKWAAK, J. E. **Numerical simulation of flow and chemical transport in integrated surface-subsurface hydrologic systems**. Tese (Doutorado) - University of Waterloo, 243p, 1999.
- VANDERKWAAK, J. E.; LOAGUE, K. Hydrologic response simulations for the R-5 catchment with a comprehensive physics-based model. **Water Resources Research**, v. 37, n. 4, p. 999–1013, 2001.
- VOECKLER, H. M.; ALLEN, D. M.; ALILA, Y. Modeling coupled surface water - Groundwater processes in a small mountainous headwater catchment. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 1089–1106, 2014.
- WENTZ, D. A.; ROSE, W. J.; WEBSTER, K. E. Long-term hydrologic and biogeochemical responses of a soft water seepage lake in north central Wisconsin. **Water Resources Research**, v. 31, n. 1, p. 199–2012, 1995.
- WERNER, A. D.; BAKKER, M.; POST V. E. A.; VANDEMBOHEDE, A.; LU, C.; ATAIE-ASHTIANI, B.; SIMMONS, C. T.; BARRY, D. A. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 3–26, March, 2013.
- WINTER, T. C. The interaction of lakes with variably saturated porous media. **Water Resources Research**, v. 19, n. 5, p. 1203, 1983.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and Surface Water A Single Resource**. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado, 1998.
- YAMAGATA, K.; BUTTS, M. B.; GROSS, J.; CLAUSEN, T. H. OpenMI coupling of FEFLOW and MIKE SHE. In: **34<sup>th</sup> Hydrology and Water Resources Symposium (HWRS)**, Sydney, Austrália, p. 52–59, 2012.
- YANG, L. et al. Characterizing interactions between surface water and groundwater in the Jialu River basin using major ion chemistry and stable isotopes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 11, p. 4265–4277, 2012.
- YU, Z. *et al.* Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. **Journal of Hydrology**, v. 218, p. 72–91, 1999.
- ZEKSTER, I. S. Groundwater discharge into lakes: a review of recent studies with particular regard to large saline lakes in central Asia. **International Journal of Salt Lake Research**, v. 4, p. 233–249, 1996.

## ANEXOS

Anexo1: Pluviometria mensal - Estação 1245015.

	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Total
1984/1985	-	-	-	0.90	19.40	118.10	176.20	72.50	316.30	77.90	251.60	151.90	
1985/1986	3.60	0.00	0.00	0.00	69.00	109.50	276.50	288.90	326.40	53.10	62.00	87.90	1276.90
1986/1987	8.00	0.00	4.50	20.80	3.20	78.40	26.70	219.50	105.40	141.40	368.00	146.80	1122.70
1987/1988	25.60	0.00	0.00	0.00	32.40	30.80	148.20	396.80	226.80	194.30	253.50	99.50	1407.90
1988/1989	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	134.20	131.10	471.90	93.90	203.40	104.80	5.70	1148.10
1989/1990	0.00	32.00	9.20	2.00	22.00	22.80	199.10	477.40	123.30	107.70	76.80	17.50	1089.80
1990/1991	165.50	0.00	4.80	29.30	16.50	39.20	87.10	156.20	370.60	179.20	234.70	136.40	1419.50
1991/1992	8.50	0.00	0.00	0.00	55.30	3.50	287.30	145.30	359.70	391.50	77.10	41.80	1370.00
1992/1993	0.00	0.00	0.00	5.80	35.90	88.20	286.20	269.90	29.60	277.00	13.50	111.70	1117.80
1993/1994	66.10	10.00	0.00	21.00	62.50	45.50	158.60	320.20	350.30	221.30	398.90	143.80	1798.20
1994/1995	4.60	9.20	0.00	0.00	0.00	95.60	169.30	152.80	237.50	429.70	193.90	91.30	1383.90
1995/1996	84.40	38.40	0.00	0.00	0.00	171.90	212.70	169.00	127.10	87.50	209.60	94.30	1194.90
1996/1997	21.00	0.00	0.00	0.00	0.00	283.00	417.30	164.60	238.40	104.90	436.10	195.70	1861.00
1997/1998	0.00	16.40	0.00	0.00	5.80	104.80	83.20	198.50	116.20	211.80	75.30	5.00	817.00
1998/1999	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	38.70	223.60	152.60	108.60	203.40	162.40	26.50	919.20
1999/2000	7.90	0.00	0.00	0.00	5.60	111.10	388.80	260.90	180.40	157.30	219.20	80.10	1411.30
2000/2001	0.00	0.00	0.00	0.00	58.80	30.90	232.00	295.60	59.90	79.80	205.40	32.50	994.90
2001/2002	30.10	0.00	0.00	0.00	12.30	122.80	187.30	159.70	199.10	102.40	135.60	82.20	1031.50
2002/2003	16.40	0.00	2.60	0.00	32.40	53.80	194.70	230.20	146.00	224.40	213.00	150.80	1264.30
2003/2004	26.20	0.00	0.00	29.40	31.50	63.80	154.30	220.20	270.00	267.20	317.00	219.00	1598.60
2004/2005	13.50	1.10	0.00	15.00	0.00	43.70	31.50	70.00	90.10	138.00	230.70	0.00	633.60
2005/2006	54.70	0.00	2.10	0.00	0.00	14.10	241.70	184.50	77.30	45.50	203.10	43.80	866.80
2006/2007	0.00	0.00	0.00	0.00	58.00	126.10	199.80	77.50	105.00	211.30	57.40	-	
2007/2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	88.90	211.20	106.00	202.30	165.30	168.20	123.00	1064.90
2008/2009	1.00	0.00	0.00	-	7.30	0.00	232.10	182.20	263.20	102.30	43.00	335.94	
2009/2010	69.30	24.10	0.00	0.00	10.30	69.90	142.00	126.20	93.80	164.40	323.00	2.80	1025.80
2010/2011	23.30	0.00	0.00	0.00	0.00	169.50	189.30	116.70	124.50	214.90	131.30	106.60	1076.10
2011/2012	16.30	0.00	0.00	0.00	0.00	112.80	209.20	119.00	296.60	93.60	52.80	36.00	936.30
2012/2013	39.20	0.00	0.00	0.00	0.00	17.60	377.40	38.50	250.00	81.30	225.20	105.80	1135.00
2013/2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.10	170.30	336.40	56.60	226.70	73.40	128.30	1071.80
2014/2015	6.90	0.00	0.00	0.00	41.20	44.00	193.10	164.60	23.90	101.40	164.20	101.40	840.70
2015/2016	50.70	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.70	38.50	23.90	45.50	13.50	0.00	633.60
<b>Máximo</b>	165.50	38.40	9.20	29.40	69.00	283.00	417.30	477.40	370.60	429.70	436.10	335.94	1861.00
<b>Média</b>	24.07	4.23	0.77	4.14	18.79	81.07	201.22	204.65	179.64	169.67	183.25	96.80	1174.23

Anexo2: Pluviometria mensal - Estação 1246001.

	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Total
1973/1974	-	-	-	0.00	0.00	276.00	276.00	235.40	171.00	259.10	331.30	191.20	
1974/1975	93.90	0.00	0.00	0.00	0.00	205.30	174.00	221.80	230.20	161.10	170.10	126.00	1382.40
1975/1976	0.00	0.00	0.00	0.00	20.20	154.60	121.30	177.00	165.00	258.40	110.60	65.80	1072.90
1976/1977	61.20	0.00	0.00	0.00	113.80	130.20	267.20	277.00	302.70	171.00	48.80	185.90	1557.80
1977/1978	34.30	17.80	0.00	0.00	26.00	83.00	133.90	307.60	310.10	321.70	232.10	196.00	1662.50
1978/1979	49.80	42.20	42.80	0.00	4.40	127.00	215.00	274.20	462.40	348.40	182.60	115.40	1864.20
1979/1980	0.00	0.00	0.00	5.40	41.00	152.40	234.00	355.50	326.80	554.60	86.20	138.80	1894.70
1980/1981	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00	26.20	532.00	359.80	304.00	50.20	292.60	103.20	1718.00
1981/1982	24.80	33.40	0.00	8.60	0.00	200.00	391.40	250.60	409.00	73.80	319.00	62.80	1773.40
1982/1983	0.00	0.00	0.00	2.40	77.80	82.20	100.60	150.60	408.70	215.20	290.00	37.00	1364.50
1983/1984	0.00	0.00	0.00	0.00	19.00	71.00	343.40	455.20	201.00	102.20	323.60	126.00	1641.40
1984/1985	0.00	0.00	0.00	8.40	30.40	216.00	115.30	241.00	531.00	144.60	134.80	168.60	1590.10
1985/1986	48.80	0.00	2.40	0.00	16.60	246.50	95.00	461.80	241.20	163.00	253.20	132.00	1660.50
1986/1987	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	159.60	77.80	186.70	252.60	117.80	491.10	162.80	1459.40
1987/1988	0.00	0.00	0.00	0.00	4.10	57.00	245.00	839.20	544.20	834.40	514.60	245.80	3284.30
1988/1989	0.00	0.00	0.00	0.00	9.20	164.30	127.30	428.10	210.00	150.40	203.00	18.00	1310.30
1989/1990	62.00	0.00	5.00	0.00	30.00	200.10	334.30	525.20	89.80	218.30	162.10	51.70	1678.50
1990/1991	77.60	0.00	0.00	18.90	36.60	66.00	132.80	168.20	485.00	336.80	220.00	124.00	1665.90
1991/1992	18.00	0.00	0.00	0.00	42.30	43.20	421.00	330.50	629.30	661.70	123.50	239.30	2508.80
1992/1993	15.30	0.00	0.00	19.40	67.00	142.00	450.70	509.90	103.20	531.00	104.10	158.80	2101.40
1993/1994	34.20	0.00	0.00	0.00	19.00	92.80	200.30	401.30	441.70	356.20	554.60	92.50	2192.60
1994/1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.50	251.20	139.40	252.60	378.50	276.80	327.80	1706.80
1995/1996	221.10	0.00	0.00	0.00	0.00	70.90	361.20	270.50	241.10	137.70	200.10	159.50	1662.10
1996/1997	126.40	7.30	0.00	0.00	0.00	173.00	237.10	259.70	355.50	192.60	623.00	191.20	2165.80
1997/1998	0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	147.20	152.50	159.50	176.40	380.40	187.40	19.40	1234.80
1998/1999	28.30	0.00	0.00	0.00	0.00	55.90	180.60	188.40	191.60	180.00	138.40	24.00	987.20
1999/2000	30.00	0.00	0.00	0.00	15.20	153.20	250.30	224.70	293.30	159.80	284.60	272.10	1683.20
2000/2001	0.00	0.00	0.60	0.00	21.00	70.00	295.50	317.20	164.20	282.80	267.00	57.80	1476.10
2001/2002	39.60	0.00	0.00	6.50	25.10	169.90	237.70	161.30	435.90	174.00	158.50	50.10	1458.60
2002/2003	52.20	0.00	0.00	0.00	103.60	83.50	51.30	176.60	153.30	306.60	368.50	197.10	1492.70
2003/2004	35.50	0.00	0.00	4.90	14.70	116.40	228.00	170.90	562.20	356.00	402.40	216.20	2107.20
2004/2005	0.00	8.70	0.00	0.00	0.00	53.50	268.80	142.30	150.90	79.70	595.10	212.80	1511.80
2005/2006	69.80	0.00	0.00	0.00	90.10	13.40	353.10	271.40	153.90	127.50	184.10	395.40	1658.70
2006/2007	138.30	0.00	0.00	0.00	38.00	-	-	-	-	-	-	-	
2007/2008	-	-	-	-	0.00	44.50	99.40	168.10	218.60	161.80	307.90	-	
2008/2009	-	0.00	0.00	0.00	8.60	0.00	410.30	556.60	149.50	165.30	118.90	262.50	
2009/2010	265.90	13.30	0.00	0.00	99.70	300.30	170.40	234.70	173.50	159.70	377.30	219.20	2014.00
2010/2011	0.80	0.00	0.00	0.00	3.90	148.30	129.50	252.60	-	396.30	381.80	94.20	
2011/2012	6.40	0.00	0.00	0.00	0.00	151.90	467.70	262.50	381.00	146.00	120.90	42.50	1578.90
2012/2013	67.80	0.00	0.00	0.00	0.00	16.30	589.50	105.10	392.40	65.80	233.30	60.80	1531.00
2013/2014	0.00	7.30	0.00	0.00	12.40	47.40	226.10	547.30	179.40	97.60	94.70	38.90	1251.10
2014/2015	35.80	0.00	0.00	0.00	0.00	116.60	179.10	49.70	54.90	66.70	233.30	317.00	1053.10
2015/2016	21.50	0.00	-	0.00	8.20	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.30	49.70	54.90	50.20	48.80	18.00	987.20
<b>Máximo</b>	265.90	42.20	42.80	19.40	113.80	300.30	589.50	839.20	629.30	834.40	623.00	395.40	3284.30
<b>Média</b>	41.76	3.17	1.27	1.77	24.65	119.71	247.01	288.17	287.48	244.99	261.02	147.50	1674.51

Anexo3: Pluviometria mensal - Estação 1245014.

	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Total
1984/1985	-	-	-	-	60.90	126.60	87.90	176.20	524.00	36.80	197.90	79.30	
1985/1986	8.00	0.00	0.00	0.00	23.30	112.50	220.70	506.60	222.40	129.10	95.50	36.60	1354.70
1986/1987	0.00	0.00	5.20	11.10	0.00	138.50	63.80	285.90	83.00	65.70	305.20	111.40	1069.80
1987/1988	59.10	0.00	0.00	0.00	6.70	23.80	323.40	334.00	163.70	252.20	210.30	167.40	1540.60
1988/1989	0.00	0.00	0.00	0.00	32.10	84.70	123.20	444.50	47.30	253.40	65.90	62.10	1113.20
1989/1990	34.30	4.50	32.70	0.00	36.60	83.80	267.30	467.90	51.70	316.00	47.60	4.30	1346.70
1990/1991	11.50	0.00	8.70	14.60	41.00	83.30	135.00	331.70	448.00	69.80	112.80	102.30	1358.70
1991/1992	0.20	0.00	0.00	0.00	25.00	12.80	228.90	233.30	442.20	313.60	17.70	132.40	1406.10
1992/1993	0.00	0.00	0.00	0.00	10.40	97.80	145.00	292.70	130.20	202.60	22.60	111.80	1013.10
1993/1994	17.70	0.00	0.00	0.10	58.10	39.00	112.00	230.60	283.00	227.90	192.00	160.00	1320.40
1994/1995	38.30	4.70	0.00	0.00	0.00	39.60	160.80	162.40	194.80	174.70	198.30	62.90	1036.50
1995/1996	39.20	0.00	0.00	0.00	2.30	118.00	286.60	267.10	84.60	35.20	154.90	48.30	1036.20
1996/1997	39.90	0.00	0.00	4.50	0.00	187.00	369.90	152.70	246.70	144.90	403.80	220.10	1769.50
1997/1998	33.70	23.00	0.00	0.00	1.90	67.20	87.50	98.50	279.20	207.60	27.70	2.30	828.60
1998/1999	41.10	3.00	0.00	8.30	0.00	110.50	185.00	289.60	164.70	210.20	179.50	3.50	1195.40
1999/2000	43.20	0.00	0.00	0.00	29.50	116.30	337.60	272.40	227.90	291.40	231.50	35.20	1585.00
2000/2001	0.00	0.00	0.70	0.00	50.00	77.30	262.00	306.20	155.40	106.30	244.90	59.80	1262.60
2001/2002	6.10	0.00	0.00	0.00	1.40	184.90	164.80	176.70	168.20	49.80	87.20	57.80	896.90
2002/2003	14.60	0.00	4.80	0.00	22.60	30.80	98.80	369.10	272.60	202.20	59.90	90.70	1166.10
2003/2004	4.40	0.00	0.00	37.60	36.30	36.40	164.90	113.20	388.90	324.60	251.00	49.40	1406.70
2004/2005	0.30	0.00	0.00	0.00	2.50	41.10	115.70	170.80	178.80	203.80	422.10	96.00	1231.10
2005/2006	90.50	0.00	0.00	0.00	24.20	18.30	257.40	322.50	51.00	227.00	225.00	179.40	1395.30
2006/2007	30.30	0.00	0.00	0.00	9.30	227.70	165.60	204.70	183.60	314.00	58.00	40.40	1233.60
2007/2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	123.60	118.20	103.80	102.40	255.10	85.30	789.90
2008/2009	9.60	0.00	0.00	0.00	26.90	17.90	304.30	183.60	207.60	54.90	156.00	231.40	1192.20
2009/2010	-	20.60	0.00	0.00	8.90	185.90	141.50	313.50	129.60	59.20	126.60	81.40	1067.20
2010/2011	30.60	0.00	0.00	0.00	0.00	145.80	168.30	140.00	143.70	237.20	216.20	54.60	1136.40
2011/2012	11.30	0.00	0.00	0.00	0.00	225.30	184.30	152.20	49.90	36.00	54.90	30.10	744.00
2012/2013	65.00	0.00	0.00	6.00	0.00	1.60	278.20	135.00	234.80	12.80	193.50	38.50	965.40
2013/2014	0.00	0.30	0.00	0.00	1.40	42.20	110.30	266.30	-	84.70	122.00	110.10	
2014/2015	2.30	0.00	0.00	0.00	1.80	20.70	42.20	150.60	51.50	74.30	152.70	211.60	707.70
2015/2016	16.30	0.00	0.00	0.00	0.00	32.00	133.10	50.30	354.30	74.90	99.70	16.00	776.60
2016/2017	0.00	14.70	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	42.20	50.30	47.30	12.80	17.70	2.30	707.70
<b>Máximo</b>	90.50	23.00	32.70	37.60	60.90	227.70	369.90	506.60	524.00	324.60	422.10	231.40	1769.50
<b>Média</b>	20.89	2.21	1.63	2.57	16.03	85.34	182.80	241.22	202.16	159.23	162.13	86.64	1164.87





Anexo 4: Pluviometria mensal - Estação 1245005.

	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Total
1972/1973	-	-	0.00	0.00	0.00	114.00	115.20	472.00	72.60	53.40	284.50	2.40	
1973/1974	36.80	4.60	0.00	0.00	30.80	300.60	106.00	140.20	163.60	126.10	303.40	184.20	1396.30
1974/1975	61.80	0.00	0.00	5.40	28.20	199.10	29.50	109.50	124.60	119.00	138.10	152.90	968.10
1975/1976	0.00	0.00	0.00	0.00	5.80	159.40	110.20	166.30	83.30	227.70	114.20	43.40	910.30
1976/1977	14.80	0.00	0.00	0.00	43.40	132.90	121.00	109.80	282.60	41.20	12.60	47.20	805.50
1977/1978	14.30	0.00	0.00	0.00	44.10	121.60	193.20	164.60	116.20	243.60	233.00	237.20	1367.80
1978/1979	154.20	56.00	40.00	0.00	15.20	63.60	170.60	148.80	304.60	197.40	113.20	80.20	1343.80
1979/1980	2.80	0.00	0.00	0.00	3.80	110.40	158.40	161.60	457.40	351.20	2.40	10.20	1258.20
1980/1981	0.00	0.00	0.00	0.00	32.40	58.00	150.20	237.20	119.20	75.80	309.60	87.20	1069.60
1981/1982	0.00	10.80	23.20	19.80	0.00	145.60	240.40	70.40	376.40	121.20	95.80	78.20	1181.80
1982/1983	0.00	0.00	0.00	6.80	54.20	44.80	101.60	64.00	243.60	175.40	267.20	30.20	987.80
1983/1984	5.20	0.00	0.00	0.00	0.00	79.40	199.60	290.40	126.20	55.20	183.00	57.20	996.20
1984/1985	0.00	0.00	0.00	7.80	49.80	209.80	26.00	78.80	540.60	94.00	100.60	104.00	1211.40
1985/1986	2.60	0.00	0.00	0.00	52.20	97.40	228.60	339.80	242.60	103.20	93.80	102.20	1262.40
1986/1987	3.20	0.00	0.00	23.70	4.90	161.50	85.70	181.80	62.30	41.20	304.40	96.70	965.40
1987/1988	16.60	0.00	0.00	0.00	8.70	81.80	295.80	174.20	209.70	116.10	174.80	111.90	1189.60
1988/1989	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	94.40	111.10	281.80	49.20	183.70	110.10	13.80	844.10
1989/1990	3.20	3.60	0.00	0.00	16.00	29.90	395.80	579.00	34.60	323.90	118.10	9.60	1513.70
1990/1991	26.60	0.00	5.30	3.60	22.30	15.40	102.30	60.80	303.80	60.90	200.80	61.70	863.50
1991/1992	0.00	0.00	0.00	0.00	17.40	5.90	216.30	110.90	432.90	328.50	11.90	29.40	1153.20
1992/1993	13.50	0.00	0.00	0.00	36.50	63.60	246.70	446.40	63.10	82.40	0.00	50.50	1002.70
1993/1994	24.70	0.00	0.00	0.00	60.50	41.10	59.00	166.70	289.80	49.20	216.90	128.80	1036.70
1994/1995	0.00	8.20	0.00	0.00	0.00	2.10	128.50	140.00	82.70	187.70	80.90	74.60	704.70
1995/1996	56.00	0.00	0.00	0.00	0.00	135.80	161.30	217.20	120.20	37.90	74.40	92.80	895.60
1996/1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	96.10	271.90	105.20	204.70	66.00	453.50	202.70	1400.10
1997/1998	0.20	7.80	0.00	0.00	11.40	134.40	60.00	128.50	141.40	159.80	87.80	9.10	740.40
1998/1999	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	70.10	239.40	187.50	119.70	170.80	121.60	0.00	911.60
1999/2000	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	151.20	265.40	292.00	131.00	248.10	115.30	38.30	1256.30
2000/2001	0.00	0.00	0.00	0.00	31.50	31.80	183.90	284.20	153.30	30.20	176.00	32.10	923.00
2001/2002	0.00	0.00	0.00	0.00	21.20	93.10	132.70	96.50	210.20	72.20	80.90	49.80	756.60
2002/2003	15.50	0.00	7.40	0.00	7.50	25.50	66.00	224.00	216.30	134.10	126.70	115.10	938.10
2003/2004	39.20	0.00	0.00	14.60	7.50	70.50	178.40	109.60	332.60	247.60	231.20	28.90	1260.10
2004/2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.60	139.00	197.70	72.50	154.30	136.80	0.00	740.90
2005/2006	85.30	0.00	0.00	0.00	21.10	5.10	124.20	303.80	20.00	124.30	243.50	154.50	1081.80
2006/2007	85.20	0.00	0.00	0.00	18.60	70.90	207.60	164.30	57.30	271.80	26.50	44.30	946.50
2007/2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.40	165.30	122.00	85.40	101.40	192.70	11.20	705.40
2008/2009	48.60	0.00	0.00	0.00	29.90	0.00	137.70	212.30	131.40	77.20	105.60	182.50	925.20
2009/2010	-	0.00	0.00	0.00	0.00	137.30	149.30	181.70	28.10	38.30	180.60	22.90	
2010/2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	104.80	142.10	74.20	96.70	113.80	82.90	55.20	669.70
2011/2012	12.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	335.20	187.30	155.00	131.80	41.00	51.60	914.80
2012/2013	25.30	0.00	0.00	0.00	0.00	23.60	319.70	28.50	312.10	40.50	130.10	108.50	988.30
2013/2014	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.00	60.40	352.20	15.80	99.10	118.20	106.20	793.90
2014/2015	0.00	0.00	0.00	0.00	35.50	53.20	174.00	152.30	81.30	59.40	84.30	88.10	728.10
2015/2016	45.30	0.00	0.00	0.00	5.70	0.00	129.50	19.10	497.80	66.60	101.60	0.00	865.60
2016/2017	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.00	19.10	15.80	30.20	0.00	0.00	669.70
<b>Máximo</b>	154.20	56.00	40.00	23.70	60.50	300.60	395.80	579.00	540.60	351.20	453.50	237.20	1513.70
<b>Média</b>	18.46	2.13	1.69	1.82	16.62	82.86	164.43	189.43	181.01	131.89	145.01	72.44	1011.30

## Anexo 5: Pluviometria mensal - Estação 1346000.

	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Total
1968/1969	-	-	-	-	-	-	-	-	138.40	76.10	186.50	15.10	
1969/1970	2.50	0.00	0.00	7.60	1.00	50.80	105.40	241.70	207.30	71.00	88.10	39.50	814.90
1970/1971	0.00	0.00	0.00	0.00	51.00	253.60	87.60	222.60	69.50	150.60	142.50	211.00	1188.40
1971/1972	0.00	0.60	0.00	1.40	35.00	64.30	232.70	148.80	113.20	89.00	181.80	153.40	1020.20
1972/1973	0.00	0.00	4.20	0.00	8.40	163.60	113.00	185.80	143.10	206.00	140.20	68.20	1032.50
1973/1974	6.20	1.80	0.00	0.00	10.00	254.00	300.60	320.40	274.50	236.80	363.00	240.40	2007.70
1974/1975	73.20	0.00	0.00	1.40	1.20	154.40	122.00	160.60	188.70	197.60	198.20	130.00	1227.30
1975/1976	14.00	0.00	0.00	0.00	0.00	326.00	219.00	117.10	155.80	329.40	84.70	30.40	1276.40
1976/1977	68.00	0.00	0.00	0.00	110.30	151.30	303.20	195.40	221.50	84.10	84.70	111.30	1329.80
1977/1978	46.70	11.60	0.00	0.00	38.70	163.30	88.30	197.80	218.30	313.10	135.90	152.90	1366.60
1978/1979	32.10	48.50	25.80	0.00	2.80	66.90	229.20	206.60	374.80	226.90	183.60	89.00	1486.20
1979/1980	3.00	0.00	0.00	27.40	32.20	178.10	241.80	203.40	498.40	491.40	54.80	107.40	1837.90
1980/1981	40.20	3.20	0.00	0.00	56.60	32.60	373.60	327.20	433.30	93.80	257.80	120.20	1738.50
1981/1982	0.00	51.00	0.00	8.00	0.00	271.20	433.40	206.10	293.00	60.20	352.80	54.20	1729.90
1982/1983	3.40	0.00	0.00	1.80	70.00	13.60	46.20	163.60	299.50	192.30	277.60	61.60	1129.60
1983/1984	0.00	0.00	0.00	0.00	20.30	89.60	166.00	233.90	141.00	87.20	191.60	86.20	1015.80
1984/1985	0.00	0.00	0.00	18.20	50.90	140.90	158.20	133.70	434.70	127.00	95.80	142.80	1302.20
1985/1986	13.20	0.00	0.00	0.00	32.30	175.20	158.70	373.60	241.60	184.70	83.20	179.80	1442.30
1986/1987	6.70	0.00	0.00	50.10	10.40	212.00	88.30	203.00	186.70	150.50	309.60	147.10	1364.40
1987/1988	25.50	0.00	0.00	0.00	9.40	74.00	280.40	362.50	157.70	241.00	372.20	63.30	1586.00
1988/1989	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	55.70	171.10	313.40	96.60	153.40	126.60	81.90	999.70
1989/1990	41.40	5.50	0.00	0.00	6.30	99.80	162.00	471.40	72.00	192.10	73.00	41.40	1164.90
1990/1991	33.20	0.00	1.60	20.30	87.10	65.00	161.30	117.20	368.10	299.30	158.00	103.00	1414.10
1991/1992	0.00	0.00	0.00	0.00	83.30	17.70	213.60	176.10	189.60	315.10	123.00	93.00	1211.40
1992/1993	4.30	0.80	0.00	0.00	73.00	174.00	345.00	258.80	77.40	294.50	46.00	60.00	1333.80
1993/1994	42.80	0.00	0.00	0.00	48.40	14.50	110.00	170.00	161.70	82.70	170.10	64.00	864.20
1994/1995	0.00	92.20	0.00	0.00	0.00	19.60	164.50	171.10	186.10	260.00	169.60	303.80	1366.90
1995/1996	74.30	0.00	0.00	0.00	0.00	144.70	210.20	110.30	138.70	109.70	155.20	84.00	1027.10
1996/1997	12.20	0.00	0.00	7.90	2.70	124.10	212.30	131.90	251.80	129.40	345.50	176.50	1394.30
1997/1998	4.10	5.70	0.00	0.00	73.10	106.40	128.00	200.10	164.30	243.70	188.40	85.60	1199.40
1998/1999	24.30	0.00	0.00	0.00	0.00	28.80	175.20	188.20	216.80	195.30	159.30	19.00	1006.90
1999/2000	28.80	0.00	0.00	1.60	39.80	138.10	277.50	392.40	246.70	169.60	305.70	100.10	1700.30
2000/2001	0.00	0.00	0.70	1.20	12.00	83.20	190.80	265.80	58.20	178.60	193.70	97.70	1081.90
2001/2002	9.30	0.00	2.60	0.00	31.80	109.20	298.70	121.70	197.70	84.70	106.70	55.70	1018.10
2002/2003	14.20	0.00	0.00	0.00	71.40	21.00	92.20	259.60	201.40	89.70	255.00	105.90	1110.40
2003/2004	17.90	0.00	0.00	0.50	23.00	16.00	84.80	121.80	288.90	270.90	139.20	50.80	1013.80
2004/2005	0.00	0.00	0.00	24.70	0.00	85.00	62.10	152.60	244.20	127.90	310.70	40.30	1047.50
2005/2006	28.20	0.00	0.00	0.00	16.80	8.60	294.20	255.50	98.90	176.50	212.30	166.40	1257.40
2006/2007	5.60	0.00	0.00	0.00	8.00	-	-	-	-	-	-	-	
2007/2008	-	-	-	-	0.00	0.30	54.20	252.80	141.50	232.00	189.90	134.50	
2008/2009	-	0.00	0.00	0.00	15.90	2.00	372.80	201.20	197.30	184.20	108.50	325.90	
2009/2010	60.80	16.60	0.00	14.30	47.80	179.50	104.90	318.20	202.40	96.70	221.70	55.30	1318.20
2010/2011	20.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.30	188.20	242.90	103.40	139.90	146.70	92.80	1034.20
2011/2012	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	161.90	205.20	175.90	146.90	92.30	89.20	11.30	882.90
2012/2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.10	434.30	110.80	289.70	85.80	140.20	263.10	1339.00
2013/2014	5.30	1.80	0.00	0.00	14.90	79.80	160.40	314.40	195.30	130.30	269.40	58.30	1229.90
2014/2015	13.70	0.00	3.50	0.00	5.10	86.30	228.60	239.60	52.20	115.00	313.50	156.30	1213.80
2015/2016	64.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	205.10	80.10	304.50	47.40	180.60	13.30	896.40
2016/2017	0.00	0.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>Mínimo</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	46.20	80.10	52.20	47.40	46.00	11.30	814.90
<b>Máximo</b>	74.30	92.20	25.80	50.10	110.30	326.00	434.30	471.40	498.40	491.40	372.20	325.90	2007.70
<b>Média</b>	18.26	5.11	0.83	4.05	25.57	103.75	196.84	217.77	206.03	172.46	184.73	107.31	1250.53

Anexo 6: Poços de bombeamento inseridos no modelo numérico

Poço	Coord. X	Coord. Y	Cota (m)	Prof. (m)	Topo Filtro	Base Filtro
2900027726	374030	8547149	930.97	200	750.97	730.97
2900027725	373966	8547793	933.62	180	773.62	753.62
2900027727	373114	8549725	909.9	120	809.9	789.9
2900021217	365095	8550546	966.8	150	836.8	816.8
2900021218	363709	8555648	978.02	150	848.02	828.02
2900021224	378664	8559700	901.33	150	771.33	751.33
2900021223	378005	8559974	901.33	150	771.33	751.33
2900021220	369123	8560136	940.46	150	810.46	790.46
2900021225	379483	8560260	894.48	150	764.48	744.48
2900021222	375615	8560490	911.2	150	781.2	761.2
2900021219	366732	8560508	955.91	150	825.91	805.91
2900021226	380062	8561478	890.87	150	760.87	740.87
2900021221	372556	8561534	928.36	150	798.36	778.36
2900021204	391754	8561906	847.61	150	717.61	697.61
2900021206	392301	8562334	844.89	150	714.89	694.89
2900021227	382581	8563296	876.75	150	746.75	726.75
2900021205	400158	8565014	831.22	150	701.22	681.22
2900021231	393626	8566916	828.97	150	698.97	678.97
2900021230	392010	8567252	841.9	150	711.9	691.9
2900021228	385582	8570182	861.28	150	731.28	711.28
2900021110	391845	8570930	843.45	150	713.45	693.45
2900021232	396948	8571560	837.44	150	707.44	687.44
2900021229	389272	8571988	852.28	150	722.28	702.28
2900021248	370470	8573306	924.98	150	794.98	774.98
2900021249	370328	8573318	924.98	150	794.98	774.98
2900021247	370394	8573340	924.98	150	794.98	774.98
2900021253	374394	8573712	905.75	150	775.75	755.75
2900021235	396100	8574034	835.03	150	705.03	685.03
2900021254	375938	8574208	898.95	150	768.95	748.95
2900021246	366451	8574868	944.48	150	814.48	794.48
2900021255	378386	8575140	883.82	150	753.82	733.82
2900021111	396485	8575484	834.44	150	704.44	684.44
2900022816	427157	8575881	771.74	80	711.74	691.74
2900021256	381319	8576216	873.53	150	743.53	723.53
2900021233	391814	8576454	847.82	150	717.82	697.82
2900021234	392002	8578402	844.41	150	714.41	694.41
2900021236	396788	8578464	831.17	150	701.17	681.17
2900021237	397110	8579524	828.82	150	698.82	678.82
2900021238	395182	8580740	831.19	150	701.19	681.19
2900021252	370527	8580844	917.08	150	787.08	767.08
2900021239	398110	8580924	827.63	150	697.63	677.63
2900021250	364253	8581062	947.02	150	817.02	797.02
2900021258	380298	8581860	872.25	150	742.25	722.25
2900021259	380433	8581890	872.25	150	742.25	722.25
2900021240	395617	8581988	832.22	150	702.22	682.22
2900021257	376209	8582302	887.35	150	757.35	737.35
2900021263	386925	8584218	857.02	150	727.02	707.02
2900021210	434684	8584950	752.58	150	622.58	602.58
2900021261	382276	8584992	865.93	150	735.93	715.93
2900021251	365107	8586220	931.54	150	801.54	781.54
2900021265	393903	8587544	833.69	150	703.69	683.69
2900021264	388136	8588150	848.83	150	718.83	698.83

Poço	Coord. X	Coord. Y	Cota (m)	Prof. (m)	Topo Filtro	Base Filtro
2900021211	433199	8588170	766.49	150	636.49	616.49
2900021319	397799	8588498	822.58	150	692.58	672.58
2900021112	397380	8588562	822.58	150	692.58	672.58
2900021318	397202	8588738	822.58	150	692.58	672.58
2900021116	397497	8588806	822.58	150	692.58	672.58
2900021317	397099	8588810	822.58	150	692.58	672.58
2900021316	397311	8589062	827.27	150	697.27	677.27
2900021315	396775	8589186	829.28	150	699.28	679.28
2900021273	397065	8589334	827.27	220	627.27	607.27
2900028837	436620	8589482	765.16	250	535.16	515.16
2900021209	436790	8589606	765.16	150	635.16	615.16
2900021272	397747	8589853	827.27	150	697.27	677.27
2900021260	385452	8590464	851.55	150	721.55	701.55
2900021262	385452	8590465	851.55	150	721.55	701.55
2900021271	397939	8590478	823.41	150	693.41	673.41
2900021269	397847	8590726	823.41	150	693.41	673.41
2900021267	365384	8590876	928	150	798	778
2900021270	397912	8590972	823.41	150	693.41	673.41
2900029594	398077	8591151	819.32	120	719.32	699.32
2900021242	397799	8591754	821.04	150	691.04	671.04
2900021268	369089	8592390	907.31	150	777.31	757.31
2900021241	399351	8593020	817.29	150	687.29	667.29
2900021298	381567	8593220	854.55	150	724.55	704.55
2900021296	374704	8594762	883.35	150	753.35	733.35
2900021214	420986	8594786	766.22	150	636.22	616.22
2900021122	409691	8595824	742.93	150	612.93	592.93
2900021297	378562	8595870	870.41	150	740.41	720.41
2900021301	391458	8596368	831.41	150	701.41	681.41
2900029605	453614	8597103	743.32	330	433.32	413.32
2900021215	422537	8597396	753.82	150	623.82	603.82
2900029596	430540	8597731	764.27	281	503.27	483.27
2900021320	453417	8597744	743.32	150	613.32	593.32
2900021299	386075	8597802	843.27	150	713.27	693.27
2900021114	387150	8598026	839.59	150	709.59	689.59
2900013369	398142	8598064	816.45	102	734.45	714.45
2900021289	368254	8599130	904.53	150	774.53	754.53
2900021300	390154	8599396	835.32	150	705.32	685.32
2900021117	399979	8599630	817.54	150	687.54	667.54
2900021288	367040	8599750	907.03	150	777.03	757.03
2900021216	423450	8599900	765.29	150	635.29	615.29
2900021287	366246	8600198	911.73	150	781.73	761.73
2900021324	428957	8600464	759.99	150	629.99	609.99
2900021302	392671	8600830	829.53	150	699.53	679.53
2900021295	382009	8600918	853.97	150	723.97	703.97
2900021325	431896	8601058	755.87	150	625.87	605.87
2900021323	437697	8601154	757.54	150	627.54	607.54
2900021290	367668	8601232	904.42	150	774.42	754.42
2900028836	431043	8601511	755.87	280	495.87	475.87
2900021291	371580	8601760	891.06	150	761.06	741.06
2900021292	375025	8602984	875.16	150	745.16	725.16
2900021115	374945	8603338	878.77	150	748.77	728.77
2900021121	426069	8603780	757.87	150	627.87	607.87
2900021303	398404	8604054	815.77	150	685.77	665.77
2900021120	427208	8604528	755.59	150	625.59	605.59

Poço	Coord. X	Coord. Y	Cota (m)	Prof. (m)	Topo Filtro	Base Filtro
2900021306	401412	8604594	811.63	150	681.63	661.63
2900021294	379117	8604890	861.61	150	731.61	711.61
2900021314	409424	8604982	771.56	150	641.56	621.56
2900021293	378786	8604992	865.26	150	735.26	715.26
2900028578	364322	8605173	910.9	300	630.9	610.9
2900021286	364234	8605386	910.9	150	780.9	760.9
2900021322	456567	8605562	706.89	150	576.89	556.89
2900021310	413420	8606206	757.44	150	627.44	607.44
2900021285	368359	8607466	894.93	150	764.93	744.93
2900021284	370224	8608089	886.68	150	756.68	736.68
2900021321	460984	8608102	724.97	150	594.97	574.97
2900021311	409823	8608790	772.18	150	642.18	622.18
2900021312	409790	8608804	772.18	150	642.18	622.18
2900021313	409792	8608804	772.18	150	642.18	622.18
2900021283	371273	8608852	882.29	150	752.29	732.29
2900021304	397665	8609262	813.83	150	683.83	663.83
2900028853	417051	8609922	764.1	80	704.1	684.1
2900021282	378726	8609939	859.03	150	729.03	709.03
2900021307	417095	8609988	764.1	150	634.1	614.1
2900021308	417109	8609998	764.1	150	634.1	614.1
2900021207	470252	8610338	709.05	150	579.05	559.05
2900021309	412982	8610436	768.3	150	638.3	618.3
2900021305	402298	8610778	798.53	150	668.53	648.53
2900021113	392734	8612976	821.91	150	691.91	671.91
2900021280	402083	8613654	773.61	150	643.61	623.61
2900021276	408534	8613840	767.68	150	637.68	617.68
2900021266	397024	8615541	793.7	150	663.7	643.7
2900021277	408874	8615738	773.04	150	643.04	623.04
2900021119	411807	8616398	769.55	150	639.55	619.55
2900021125	458644	8617706	699.21	150	569.21	549.21
2900027475	473531	8617986	695.05	81	634.05	614.05
2900029595	473682	8618140	708.6	81	647.6	627.6
2900026481	472172	8618353	707.13	90	637.13	617.13
2900028835	472775	8618353	707.13	90	637.13	617.13
2900027628	395744	8618638	809.45	65	764.45	744.45
2900021244	474094	8618758	697.08	150	567.08	547.08
2900021243	474010	8618806	697.08	150	567.08	547.08
2900021245	474785	8618934	697.08	150	567.08	547.08
2900021118	414206	8619002	770.82	150	640.82	620.82
2900021281	402707	8620018	786.59	150	656.59	636.59
2900021279	416764	8620348	769.74	150	639.74	619.74
2900027633	407542	8620553	777.57	150	647.57	627.57
2900021109	450434	8621402	691.48	150	561.48	541.48
2900027632	404369	8621433	783.42	80	723.42	703.42
2900021275	404421	8621462	783.42	150	653.42	633.42
2900027634	409682	8621512	777.48	150	647.48	627.48
2900021278	409739	8621540	777.48	150	647.48	627.48
2900028863	465044	8621786	713.5	233	500.5	480.5
2900027631	407113	8622610	745.64	80	685.64	665.64
2900021123	451246	8623508	708.29	150	578.29	558.29
2900021274	406410	8624444	782.65	150	652.65	632.65
2900021124	457163	8624536	693.16	150	563.16	543.16
2900027605	439045	8626319	734.17	80	674.17	654.17
2900027603	434394	8626709	720.3	80	660.3	640.3

Poço	Coord. X	Coord. Y	Cota (m)	Prof. (m)	Topo Filtro	Base Filtro
2900027598	417273	8627187	768.42	150	638.42	618.42
2900027604	436416	8627205	738.22	70	688.22	668.22
2900027627	429591	8627465	737.47	150	607.47	587.47