



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

BALANÇO HÍDRICO TRANSITÓRIO E ANÁLISE DAS
VARIAÇÕES DE NÍVEIS D'ÁGUA NA PORÇÃO
MERIDIONAL DO AQUÍFERO URUCUIA - BAHIA

LEANIZE TEIXEIRA OLIVEIRA

SALVADOR

2020

**BALANÇO HÍDRICO TRANSITÓRIO E ANÁLISE DAS
VARIAÇÕES DE NÍVEIS D'ÁGUA NA PORÇÃO
MERIDIONAL DO AQUÍFERO URUCUIA - BAHIA**

Leanize Teixeira Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Co-orientador: Prof. Dr. Harald Klammler

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2020

O48 Oliveira, Leanize Teixeira

Balanço hídrico transitório e análise das variações de níveis d'água na porção meridional do aquífero Urucuia – Bahia/ Leanize Teixeira Oliveira . – Salvador, 2012.

100f.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Coorientador: Prof. Dr. Harald Klammler

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.
Instituto de Geociências, 2020.

1. Bacias hidrográficas – Oeste da Bahia. 2. Aquíferos. 3. Hidrogeologia. I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II. Klammler, Harald. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDU 556.33

LEANIZE TEIXEIRA OLIVEIRA

**BALANÇO HÍDRICO TRANSITÓRIO E ANÁLISE DAS VARIAÇÕES
DE NÍVEIS D'ÁGUA NA PORÇÃO MERIDIONAL DO AQUIFERO
URUCUIA - BAHIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 05/10/2020.

TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador - PPPGG/UFBA



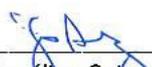
Dr. José Geilson Alves Demétrio
Examinador Externo – UFPE



Dra. Maria do Rosário Zucchi
Examinador Externo - IF-UFBA



Dr. Mário Jorge de Souza Gonçalves
Examinador Externo – INEMA



Dra. Joana Angélica Guimarães da Luz



Dra. Joana Angélica Guimarães da Luz
Examinador Externo – UFSB

Salvador – BA

2020

*“Andei.
Por caminhos difíceis, eu sei.
Mas olhando o chão sob meus pés,
vejo a vida correr.
E, assim, cada passo que der,
tentarei fazer o melhor que puder.
Aprendi...
De tudo ficarão três coisas:
a certeza de estar sempre começando,
a certeza de que é preciso continuar
e a certeza de ser interrompido antes de
terminar.
Fazer da queda um passo de dança,
do medo uma escada, do sonho uma
ponte, da procura um encontro.”*

Fernando Sabino.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES – Código de financiamento 001.

Gratidão denota o reconhecimento por um benefício, auxílio ou favor recebido e nesse sentido acredito que todos os seres que cruzam nosso caminho ou seguem nossas vidas em momentos de alegrias, desafios e/ou obstáculos, nos acrescentam e são fundamentais para concluir nossos objetivos. Agradeço ao meu Deus pela sabedoria e inspiração, fonte indissociável do crescimento. Ao meu filho e meus pais minha gratidão pela força que representam e por entenderem minha ausência em suas vidas. Ao Serviço Geológico do Brasil pelo apoio e financiamento desta pesquisa. Aos chefes, amigos e parceiros do SGB por todo o apoio demonstrado durante essa jornada de trabalho, não me arrisco a nominá-los, pois receio deixar alguém de fora. Ao professor Haki, que com toda sua paciência e conhecimento possibilitou a conclusão deste trabalho, minha eterna gratidão. Ao meu orientador pela confiança demonstrada. Aos geólogos Dr. Nilson Guiguer e Msc. Mauro Prado pela atenção e discussões. Ao Dr. Zildete Rocha por seu apoio. Ao meu querido amigo Professor Carlos Uchoa sempre tão solidário e aos meus sobrinhos lindos, Gabriel, Ariana e Larissa, obrigada pelo apoio. À minha irmã Gal, que mesmo não sabendo, me mostrou que o perdão e a compaixão são duas virtudes poderosas. E a todos meus amigos, essa “grande família que o coração escolhe”, que acreditaram e torceram por mim.

RESUMO

O Oeste do estado da Bahia-Brasil, maior área de agronegócio do estado, experimenta uma progressiva ocupação a partir da década de 80, ocasionando pressão sobre os recursos hídricos, principalmente após a introdução da irrigação, e já apresentando conflitos entre usuários das águas. O recurso hídrico tem sido a mola propulsora das atividades agrícolas, e dado a sua importância estratégica e ao acoplamento hidráulico entre rios e aquíferos, os estudos hidrológicos necessitam de análises que integrem a dinâmica das águas superficiais e subterrâneas. Esta pesquisa apresenta uma análise espacial e temporal dos componentes do balanço hídrico visando entender a dinâmica dos principais fluxos d'água das bacias dos rios Arrojado, Formoso e Éguas, afluentes da bacia do rio Corrente-Bahia, e seus reflexos nos níveis d'água subterrânea do aquífero Urucuia. Os efeitos da extração de águas subterrâneas por poços em uma porção do Sistema Aquífero Urucuia e a quantificação dos componentes do Balanço hídrico foram feitos utilizando a simulação de fluxo hídrico subterrâneo em regime estacionário para três cenários: i) sem bombeio; ii) com bombeio atual e; iii) com 60% a mais de extração por poços. Após definição das vazões de produção dos poços atuais ($4,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e da modelagem da geometria da base do aquífero (espessura máxima de 535 m), os modelos estacionários sem bombeio e com bombeio mostram que, a longo prazo, o armazenamento de água subterrânea diminui em 2 km^3 (rebaixamento médio no aquífero de 0.8 m) sem interferências na direção de fluxo regional. O balanço de massa mostra que o fluxo de base dos rios principais é reduzido em aproximadamente 6% após a extração de água subterrânea atual e mais 2,5% após acréscimo de extração. Foi utilizado ainda a análise isotópica em conjunto com a simulação numérica de fluxo transiente para descrever a dinâmica dos componentes do balanço hídrico entre 2005 e 2018. A análise isotópica evidencia a interação rio-aquífero, o efeito da evapotranspiração na recarga e o efeito quantidade. Os resultados mostram diminuição progressiva da recarga entre 2012 e 2017, a importância da evapotranspiração nos cálculos da recarga, e diminuição das chuvas, causando o declínio nos níveis d'água subterrâneos e do fluxo de base dos rios (as vazões médias dos rios também vêm sofrendo declínio, sendo um reflexo das ações conjuntas de diminuição de fluxo de base e retiradas diretas de águas para irrigação), e sugere que recargas efetivas ocorrem em chuvas de grande volume. A simulação prevê ainda que caso ocorra uma diminuição de recarga em 10%, cargas hidráulicas e fluxos de base tardam aproximadamente uma década para se reequilibrarem. Considerando que a exploração de aquíferos deve ser norteada pela sustentabilidade ambiental do sistema hídrico no sentido de equilibrar as condições de bombeio à mitigação de suas consequências, torna-se evidente a importância de monitoramento hidroclimatológico contínuo e mensuração das retiradas, visando acompanhar a dinâmica entre demandas e disponibilidades hídricas. Os resultados apontam para um impacto maior da exploração dos aquíferos sobre rios, causado por uma redução no armazenamento e no fluxo de base.

Palavras-chave: Simulação de fluxo; Aquífero Urucuia; Balanço hídrico; Análise isotópica.

ABSTRACT

The west of the state of Bahia-Brazil, the largest agribusiness area in the state, is experiencing a progressive occupation since the 1980s, causing pressure on water resources, mainly after the introduction of irrigation, and already presenting conflicts between water users. The water resource has been the driving force behind agricultural activities, and given its strategic importance and the hydraulic coupling between rivers and aquifers, hydrological studies need analyzes that integrate the dynamics of surface and groundwater. This research presents a spatial and temporal analysis of the components of the water balance in order to understand the dynamics of the main water flows in the Arrojado, Formoso and Éguas watershed, tributaries of the Corrente river basin in Bahia, and their reflections in the groundwater levels of the Urucuia aquifer. The effects of the extraction of groundwater by wells in a portion of the Urucuia Aquifer System and the quantification of the components of the water balance were made using the simulation of groundwater flow in a stationary regime for three scenarios: i) without pumping; ii) with current pumping and; iii) with 60% more extraction by wells. After defining the production flows of the current wells ($4.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) and modeling the geometry of the aquifer base (maximum thickness of 535 m), the stationary models without pumping and with pumping show that, in long term, groundwater storage decreases by 2 km^3 (average drop in the 0.8 m aquifer) without interference in the direction of regional flow. The mass balance shows that the base flow of the main rivers is reduced by approximately 6% after the current groundwater extraction and a further 2.5% after the increased extraction. Isotopic analysis was also used in conjunction with the numerical simulation of transient flow to describe the dynamics of the components of the water balance between 2005 and 2018. The isotopic analysis highlights the river-aquifer interaction, the effect of evapotranspiration on the recharge and the amount effect. The results show a progressive decrease in recharge between 2012 and 2017, the importance of EVPT in recharge calculations, and a decrease in rainfall, causing a decline in groundwater levels and the base flow of rivers (average river flows also come declining, reflecting joint actions to decrease base flow and direct withdrawal of water for irrigation), and suggests that effective recharges occur in high volume rains. The simulation also predicts that in the event of a 10% decrease in recharge, hydraulic loads and base flows take approximately a decade to rebalance. Considering that the exploitation of aquifers must be guided by the environmental sustainability of the water system in order to balance the pumping conditions and the mitigation of their consequences, the importance of continuous hydroclimatological monitoring and measurement of withdrawals becomes evident, aiming to follow the dynamics between demands and water availability. The results point to a greater impact of the exploitation of aquifers on rivers, caused by a reduction in storage and base flow.

Keywords: Flow simulation; Urucuia aquifer; Water budget; Isotopic analysis.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO GERAL	08
CAPÍTULO 2. ARTIGO 1: ANALYSIS OF THE LONG-TERM EFFECTS OF GROUNDWATER EXTRACTION ON THE WATER SYSTEM IN PART OF THE URUCUIA AQUIFER	18
CAPÍTULO 3. ARTIGO 2: BALANÇO HÍDRICO TRANSITÓRIO DO AQUIFERO URUCUIA MERIDIONAL NA BAHIA	42
CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DE CO-AUTORES	78
APÊNDICE B – TABELAS DE DADOS	
B1. Dados de precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) e recarga	80
B2. Dados primários e secundários das análises isotópicas	83
APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS NAS ANÁLISES ISOTÓPICAS DAS AMOSTRAS DE CHUVA, RIOS E POÇOS E DOS POÇOS DE MONITORAMENTO	86
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA AMBIENTE E ÁGUA .	89
ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	94
ANEXO C – COMPROVANTE DE PUBLICAÇÃO DO ARTIGO 1	96
ANEXO D – COMPROVANTE DE PUBLICAÇÃO DO ARTIGO 2	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

O entendimento do ciclo hidrológico e seu comportamento em função de mudanças antrópicas ou naturais é de fundamental importância não só do ponto de vista acadêmico, mas principalmente do ponto de vista sócioeconômico e ambiental. O estudo integrado dos componentes do balanço hídrico e a quantificação dos fluxos são primordiais para auxiliar na compreensão da dinâmica dos recursos hídricos, principalmente quando a análise é transiente, sendo considerado um dos principais propósitos da hidrologia (Eagleson, 1994; Viaroli et al., 2018). Conhecer as taxas de entrada e saída de fluxos no aquífero, em resposta a retiradas por bombeamentos ou oscilações no fluxo de entrada, é de fundamental importância para entender a dinâmica do sistema e possui uma aplicabilidade ainda maior quando analisado a partir das variabilidades espaciais e temporais. Desta forma a variabilidade dos componentes como recarga, fluxo de base e armazenamento, e o quanto esses componentes são sensíveis às variações de parâmetros como a precipitação, evapotranspiração, presença e localização de corpos d'água superficiais e bombeio de poços, entre outros, são cruciais para caracterização e entendimento da dinâmica do sistema hídrico. Entende-se aqui como sistema hídrico o conjunto dos principais componentes de fluxos de entrada e saída de água no aquífero, que se apresenta interdependente e conectados, incluindo o componente artificial de bombeio por poços.

A abordagem do estudo a partir da dinâmica espaço-temporal na análise dos fluxos de água de um sistema hídrico favorece a avaliação das águas subterrâneas visando à sustentabilidade dos recursos hídricos (Alley et al., 1999; Sophocleous, 2002; Thomas e Famiglietti, 2015), termo que vem sendo mais aceito e adotado em detrimento ao anterior “safe yield” definido por Todd (1959), ou “optimal yield” de Freeze & Cherry (1979). O

conceito de sustentabilidade do recurso hídrico subterrâneo (Alley et al., 1999) considera que os efeitos do bombeio devem ser observados no sentido de manter a exploração por um tempo “indefinido” sem causar consequências inaceitáveis dos pontos de vista ambiental, social e econômico, definindo o contexto do sistema hídrico do qual o aquífero faz parte e, atribuindo uma perspectiva de longo prazo na avaliação. Posteriormente, vários autores retomam a questão de sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, seja propondo novas abordagens para definir a exploração ideal, seja na definição de termos (Sophocleous, 2002; Maimone, 2004; Zhou, 2009, Chaminé, 2015).

Em áreas agrícolas, a disponibilidade hídrica norteia o ritmo das atividades econômicas sendo que o uso da agricultura de sequeiro (aproveitamento unicamente das águas de chuva) tem sido cada vez mais substituído ou alternado por técnicas de irrigação utilizando-se de recursos hídricos subterrâneos (a partir de poços tubulares) e/ou bombeio direto de águas superficiais (rios e lagos). Os efeitos do bombeamento de poços sobre sistemas hídricos regionais geralmente manifestam-se lentamente ao longo dos anos e a espacialização dos poços bem como sua dinâmica no regime de bombeio e outros condicionantes do meio físico exercem grande influência. Bombeio de águas subterrâneas e reposição por recarga frequentemente são variáveis dinâmicas do ponto de vista sazonal e interanual.

Nesta pesquisa, optou-se pela metodologia da simulação numérica de fluxo estacionário e transiente, utilizando-se também da interpretação de análises isotópicas para investigação complementar e ratificação do modelo conceitual. Zhou, 2009; Fienen et al., 2017, Barlow et al., 2018; Xu et al., 2000, comentam que a modelagem matemática numérica de fluxo de água subterrânea é a melhor ferramenta disponível para simular os impactos de cenários propostos sobre o desenvolvimento de águas subterrâneas. As soluções numéricas, como as aplicadas na ferramenta computacional MODFLOW (Harbough et al, 2000; Mcdonald e Harbough, 1988; Harbough e Mcdonald, 2003), possuem maior capacidade de

aproximação das condições reais do sistema para cálculos de componentes do balanço hídrico. A resposta das cargas hidráulicas do aquífero a stress do tipo bombeamento por poços e/ou oscilações da recarga, necessita ser acompanhada e até prevista em cenários preditivos no intuito de possibilitar minimizar impactos e planejar ações de investimentos econômicos ou ações de gestão das águas.

Neste contexto, a região Oeste da Bahia representa um caso típico onde atividades econômicas essencialmente agrícolas representam atualmente um grande polo de agronegócio, e implicam em constante demanda hídrica, dada a sua crescente expansão, tendo sofrido um aumento das áreas irrigadas nas últimas três décadas, e já apresentando conflitos pelo uso da água (CPT, 2018; Miranda, 2015; Saraiva, 2015). O aquífero Urucuia, além de sua importância estratégica para o desenvolvimento econômico regional, mantém o fluxo de base das drenagens e contribui para as Bacias hidrográficas dos rios Tocantins e São Francisco. Em função da conexão hidráulica perfeita entre rios e aquífero, o estudo dos componentes do sistema em conjunto é de extrema relevância quando comparado ao estudo isolado de recargas, reservas, dinâmicas de rios e/ou exploração por poços.

O aquífero Urucuia ocorre em uma extensa área da Bacia Sedimentar Sanfranciscana, estendendo-se por aproximadamente 120.000km², abrangendo parte dos estados da Bahia, Minas Gerais, Tocantins, Piauí, Maranhão, e pequenas porções de Goiás. Como o estudo integrado dos componentes do ciclo d'água no sistema hídrico norteou toda a pesquisa, a base territorial foi a bacia hidrográfica, vista como recorte espacial sistêmico na gestão integrada de recursos hídricos, Souza (2013) e contribuindo para melhor discretização do modelo e atribuição das condições de contorno. Assim, foi escolhida uma área piloto de estudos tomando-se como referência a unidade bacia hidrográfica. Neste sentido o aquífero pesquisado, Sistema Aquífero Urucuia, aflora por toda a área estudada que compreende as sub-bacia dos rios Éguas, Arrojado e Formoso pertencentes à bacia hidrográfica do rio

Corrente (afluente da margem esquerda do rio São Francisco), situada no estado da Bahia, correspondendo a cerca de 20% da área aflorante total do Grupo Urucuia. Apesar da dimensão em escala regional (Barthel e Banzhaf, 2016; Barthel, 2014) da área de estudo (aproximadamente 20.000 km²) considera-se que esta porção do aquífero Urucuia apresenta homogeneidades em alguns aspectos fisiográficos, geológicos e hidrogeológicos que permitiram algumas simplificações no modelo conceitual e consequentemente atenuando a complexidade do estudo e podendo ser enquadrada nesse sentido como de escala de sub-bacia a exemplo de: uniformidade de relevo (patamar plano com baixa declividade); uniformidade geológica, sendo constituída de uma única unidade hidroestratigráfica (Formações Posse e Serra das Araras); predominância de um único tipo de solo, latossolo (excetuando as áreas de vale); e uniformidade de uso e ocupação do solo (predominantemente agrícola e Cerrado).

Estudos hidrogeológicos feitos por diversos autores ao longo dos últimos anos (e.g. Pimentel et. al., 2000; Schuster et al., 2002; Nascimento, 2003; SRH, 2003; Schuster, 2003a; Schuster, 2003b; Gaspar, 2006; CPRM, 2008; Schuster et al., 2010; Oliveira et al., 2008; CPRM, 2012; ANA, 2013; Engelbrecht e Chang, 2015; Barbosa, 2016; Gonçalves e Chang, 2017; ANA, 2017; Gonçalves et al., 2018; Mantovani et al., 2019) contribuíram para o conhecimento do aquífero. A inovação desta pesquisa refere-se à possibilidade de análise dos fluxos de entrada e saída do balanço hídrico sob uma perspectiva temporal, possibilitando compreender o sistema hídrico de forma dinâmica e não de forma estática como nos estudos anteriores. A análise do sistema hidrodinâmico possibilitou acompanhar a dinâmica dos níveis d'água no aquífero, do armazenamento, do fluxo de base, e da recarga, com reflexões sobre a influência da espessura da zona não saturada na dinâmica do ciclo da água e fazer uma breve análise preditiva com relação à variação da recarga e seus reflexos nos componentes do sistema.

Segundo Dickinson et al., (2014), variações temporais nas infiltrações de água na superfície do solo, periódicas ou episódicas, resultam em variações temporais verticais nas recargas efetivas que podem gerar incertezas nas variações transitórias da recarga, como sugerida neste trabalho. Da mesma forma interligada, os níveis d'água subterrânea respondem às variações dos componentes do balanço hídrico de forma dinâmica temporal e espacialmente. O cálculo de recarga, considerando a sua espaço-temporalidade é de fundamental importância (Scanlon e Dutton, 2003), e é calculado nesta pesquisa tendo sido distinguido três zonas baseadas na distribuição das isoietas e das estações pluviométricas.

A análise temporal foi viabilizada pela existência de dados primários de níveis da água subterrânea, levantados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, obtidos em uma rede de poços dedicados por até 3 anos de observação (e a simulação foi feita por aproximadamente 14 anos de observação (2005-2019) compondo a análise da simulação transitória do Balanço Hídrico). Esta rede tem caráter permanente e contínuo em alguns aquíferos nacionais, entre eles o aquífero Urucuaia, onde dataloggers fazem registros automáticos com frequência horária de nível da água e pressão barométrica, em poços tubulares dedicados. Os dados climatológicos foram de igual importância para possibilitar o cálculo de evapotranspiração e posteriormente da recarga.

O escopo desta tese é o cálculo do balanço hídrico usando resultados da simulação estacionária e transiente e a análise dos rebaixamentos de níveis d'água, em parte do sistema aquífero Urucuaia, através da modelagem matemática numérica de fluxo de água subterrânea no estado estacionário e transiente e a análise isotópica de forma complementar. Utilizam-se dados primários de níveis d'água de oito poços de monitoramento e dados hidrológicos de estações climatológicas, contribuindo com o conhecimento hidrogeológico da área.

Nos apêndices B e C encontram-se os dados da série histórica tabelados de precipitação, evapotranspiração real e potencial e recarga, das três zonas admitidas em função

das isoietas e distribuição das estações pluviométricas, além das coordenadas dos pontos de amostragem de coletas de água para análises isotópicas e seus respectivos resultados para ^3H , $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$.

Os objetivos gerais são: (i) quantificação dos fluxos de entrada e saída de água no aquífero a partir da modelagem numérica de fluxo; (ii) análise dos efeitos da descarga artificial por poços e da recarga sobre o fluxo de base dos rios; (iii) acompanhamento da dinâmica temporal das cargas hidráulicas e (iv) análise preditiva dos componentes do balanço hídrico visando verificar a dinâmica do comportamento hidráulico do sistema hídrico à diminuição fictícia da recarga e aumento de bombeio.

Os objetivos específicos são: (i) modelagem geológica com a caracterização da geometria da base do aquífero; (ii) análise espacial e temporal das cargas hidráulicas; (iii) comportamento da recarga da água subterrânea do ponto de vista espacial e temporal; (iv) dimensionamento da descarga subterrânea por bombeio de poços (v) simulação do balanço de massa do sistema com e sem bombeio; (vi) simulação do fluxo de água subterrânea em estado estacionário e transiente.

Visando corroborar com o modelo conceitual proposto para a modelagem de fluxo de água subterrânea, foram comparadas assinaturas isotópicas das águas de chuva, superficiais e subterrâneas, incluindo análises das variações espaciais e temporais (águas superficiais) no conteúdo isotópico e datação por Trítio. O modelo numérico de fluxo de água subterrânea foi construído inicialmente para

simulação de fluxo em estado estacionário (2015) e posteriormente em estado transiente (2005 a 2019), a partir de dados hidrológicos e geológicos disponíveis. A partir do modelo transiente calibrado foi feita uma simulação pra prever a resposta do aquífero a uma diminuição de 10% na recarga até 2035. A simulação estacionária foi feita inicialmente utilizando a condição de contorno carga constante na porção leste da área (admitindo-se uma

condição de fonte infinita de água na célula) e posicionada a partir de mapas potenciométricos da área. Contudo, visando à simulação de fluxo transiente a posteriori e retirar a incerteza do posicionamento da carga constante, optou-se por trocar a condição carga constante especificada pela condição de fluxo nulo (no flow) no contato das unidades litológicas Grupo Urucuia/embasamento cristalino a leste.

Esta tese apresenta-se na forma estruturada de artigos, precedidos pelo capítulo de introdução e finalizada com as considerações finais, apêndices e anexos. O capítulo 2 corresponde ao artigo submetido, aceito e publicado na revista *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of applied Science* intitulado “Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia – Brazil”, e o capítulo 3 corresponde ao artigo submetido e aceito na revista *Águas Subterrâneas*, intitulado “Balanço Hídrico Transitório do aquífero meridional Urucuia na Bahia”.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada**, Relatório Final – Volume 2. Consórcio Engecorps - Walm - Brasília: ANA, SIP, 2013.108p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). (2017). **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo** / Agência Nacional de Águas. Retrieved from [//metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453](http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453).
- ALLEY, W.; REILLY, T.E.; FRANKE, O.L. **Sustainability of Ground-Water Resources**. Washington: USGS, 1999. (U.S. Geological Survey Circular, 1186).
- BARBOSA, N. S, **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia**, Bahia. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, 170p.
- BARLOW, P. M., LEAKE, S.A., FIENEN, M. N. **Capture Versus Capture Zones: Clarifying Terminology Related to Sources of Water to Wells**. Vol. 56, No. 5–Groundwater–September-October 2018 (p. 694–704).

- BARTHEL, R. (2014). **A call for more fundamental science in regional hydrogeology.** Hydrogeol J 22:507–510
- BARTHEL, R.; BANZHAF, S. 2016. **Groundwater and Surface Water Interaction at the Regional-scale – A Review with Focus on Regional Integrated Models.** Water Resour Manage, v. 30, p. 1-32.
- CHAMINÉ, H.I. **Water resources meet sustainability: new trends in environmental hydrogeology and groundwater engineering.** Environmental Earth Science, v. 73, p. 2513-2520, 2015.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Brasil). **Hidrogeologia do aquífero Urucuia: Bacias dos Rios Arrojado e Formoso, Bahia.** Brasília: CPRM, 2008. 1 CD-ROM. Projeto Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (Brasil). **HIDROGEOLOGIA DA BACIA SEDIMENTAR SANFRANCISCANA - AQUÍFERO URUCUIA: SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS ARROJADO, FORMOSO E CORRENTINA.** Brasília: CPRM, 2012. Relatório Interno.
- CPT – COMISSÃO PASTORAL DA TERRA. 2018. <https://www.cptnacional.org.br/publicacoes/noticias/conflitos-no-campo/4103-populacao-de-correntina-vai-as-ruas-em-defesa-das-aguas>. Disponível na internet em 12.01.2018.
- DICKINSON, J.E, FERRÉ, T.P.A, BAKKER, M. & CROMPTON, B. **A Screening Toll for Delineating Subregions of Steady Recharge within Groundwater Models.** 2014. Vadose Zone Journal. Vol. 13, issue 6. 15p.
- EAGLESON, P.S., 1994. **The evolution of modern hydrology (from watershed to continent in 30 years).** Adv. Water Resour. 17 (1), 3–18.
- ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. **Simulação numérica de fluxo de águas do Sistema aquífero Urucuia na Bacia Hidrogeológica do rio Corrente (BA).** Revista Águas Subterrâneas, v.29, n.2, p.244-256, 2015. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.28435>
- FIENEN, M.N., BRADBURY, K.R., KNIFFIN, M., BARLOW, P.M. 2017. **Depletion Mapping and Constrained Optimization to Support Managing Groundwater Extraction.** Ground water. V.56, n1.18-31 p, <https://doi.org/10.1111/gwat.12536>
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. Groundwater. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604p.
- GASPAR M.T.P. 2006. **Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão.** Brasília, Tese de Doutorado n° 76, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 158p e anexos.
- GONÇALVES, R. D.; CHANG, H. K. **Modelo Hidrogeológico do aquífero Urucuia na bacia do rio Grande (BA).** Revista Geociências, v.36, n.2, p.205-220, 2017. <http://orcid.org/0000-0002-3088-1000>
- GONÇALVES, R.D., ENGELBRECHT, B.Z., CHANG, H.K., 2018. **Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil.** Águas Subterrâneas 32 (1), 10. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28916>.

- HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M. C.; MCDONALD, M. G. **Modflow-2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model – User Guide to Modularization concepts and the groundwater flow process**. Washington: USGS, 2000. 130p.
- HARBAUGH, A. & MCDONALD, M. G. **The history of MODFLOW**. *GroundWater*, Mar/Apr, 2003, vol.41(2), pp.280-283.
- MAIMONE, M. **Defining and managing sustainable yield**. *Ground Water*. v, 42, n. 6, p. 809–814, 2004.
- MANTOVANI, E.C. et al. **Relatório Técnico Final – Estudo do Potencial Hídrico da Região Oeste da Bahia: Quantificação e Monitoramento da Disponibilidade dos Recursos do Aquífero Urucuia e Superficiais nas Bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhonha**. Viçosa, MG : (S.n.), 2019. 359p. ;il. (algumas color.). 23 cm.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model**. Reston: USGS, 1988. 586p.
- MIRANDA, M. A. Viral. Fala Barreiras.com, Barreiras, 27 jan. 2015. Disponível em: <https://www.falabarreiras.com/viral/conflito-de-agua-entre-a-pch-do-sitio-grande-e-populacoes-ribeirinhas/>. Acesso em: 23 jan. 2018.
- NASCIMENTO, K.R.F., (coord.). 2003. **Uso conjunto das águas superficiais e subterrânea da Sub-242 Bacia do Rio das Fêmeas- Bahia**. Relatório Final. ANA/ GEF/ PNUMA OEA, Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). Salvador- BA. 208 p.
- OLIVEIRA, L.T., LUZ, J.A.G., CAMPOS, J.C.V., LIMA, O.A., LEAL, L.R.B., 2008. **Comportamento hidrogeológico do Grupo Urucuia: Sub-bacia dos rios Formoso e Arrojado**. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais, pp.1-15.
- PIMENTEL A.L., AQUINO R.F., SILVA R.C.A., VIEIRA C.M.B. 2000. **Estimativa da recarga do aquífero Urucuia na sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas**. In: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Congresso sobre Aproveitamentos e Gestão de Recursos Hídricos em países de Idioma Português, 1, *Atas*, CD-rom.
- SARAIVA, R. **Guerra pela água em Correntina se arrasta desde 2015**. Correio 24 Horas, Salvador, 2017. Available at: <https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/guerra-pela-agua-em-correntina-se-arrasta-desde-2015/>. Access: 6 May 2019.
- SCANLON, B.R.; DUTTON, A. and Sophocleous, M. **Groundwater Recharge in Texas : The University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, 2003**. Disponível em: <http://www.beg.utexas.edu/files/content/beg/research/swr/pubs/TWDBRechRept.pdf>
- SCHUSTER, H. D. M.; SILVA, F. F.; TEIXEIRA, S.L.; BATISTA, L.H.G.; FREITAS, W.A. 2002. **Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia no Oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos**. In: XII Cong. Bras. de Águas subterrâneas. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22736>.
- SCHUSTER, H. D. M. **Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição de parâmetros para outorga de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do Rio do Cachorro: oeste do Estado da Bahia**. Salvador: [S.n], 2003a. 125p.

- SCHUSTER, H. D. M. **Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição do distanciamento entre poços e mananciais no Oeste Baiano: Relatório Final.** Salvador, DMG/UFCG/CCT, 2003b. 42p.
- SCHUSTER, H. D. M.; CRUZ, J. L. F.; SILVA, F. F. **Modelagem do efeito de bombeamento na depleção de rios. Parte 2: simulações de um caso real no Oeste da Bahia.** In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza-CE. **Anais[...]** Fortaleza: ABRH, 2010. 1 CD-ROM.
- SOPHOCLEOUS, M. 2002. **Interactions between groundwater and surface water: the state of the Science.** Hydrogeology Journal. v. 10, p.52-67.
- SOUZA, J.O.P. 2013. **Dos Sistemas ambientais ao sistema fluvial – Uma revisão de conceitos.** Caminhos de Geografia. v.14, n. 6, p. 224-233.
- SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA. **Uso Conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas - Bahia.** Salvador: SRH, 2003. 166p.
- THOMAS, B.F.; FAMIGLIETTI, J. S. **Sustainable Groundwater Management in the Arid Southwestern US: Coachella Valley, California** Brian F. Water Resour Manage (2015) 29:4411–4426. DOI 10.1007/s11269-015-1067-y
- TODD, D.K., 1955. Groundwater in relation to a flooding stream. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 81 p. 1-20, separate 28.
- VIAROLI, STEFANO ; MASTRORILLO, LUCIA ; LOTTI, FRANCESCA ; PAOLUCCI, VITTORIO ; MAZZA, ROBERTO. **The groundwater budget: A tool for preliminary estimation of the hydraulic connection between neighboring aquifers.** Journal of Hydrology, January 2018, v.556, pp.72-86
- XU Y, BRAUNE E, COLVIN C, LE MAITRE D, PIETERSEN K, HATTON T (2000) **Comprehensive determination of the resource directed measures for groundwater.** In: Sililo et al (eds) **Groundwater: past achievements and future challenges.** Balkema, Dordrecht, The Netherlands
- ZHOU, Y. 2009. **A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability.** Journal of Hydrology 370 (2009) 207–213.

CAPÍTULO 2

ARTIGO 1



Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science
 ISSN 1980-993X - doi:10.4136/1980-993X
 www.ambi-agua.net
 E-mail: ambi.agua@gmail.com

Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia – Brazil

ARTICLES doi:10.4136/ambi-agua.2390

Received: 10 Mar. 2019; Accepted: 15 Oct. 2019

Leanize Teixeira Oliveira^{1,2*}; Harald Klammmler³;

Luiz Rogério Bastos Leal³; Eduardo Moussale Grissolia⁴

¹Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Avenida Ulysses Guimarães, n° 2862, CEP: 41213-000, Salvador, BA, Brazil

²Departamento de Geologia. Instituto Federal da Bahia (IFBA), Rua Emídio Santos, s/n, CEP: 40301-015, Salvador, BA, Brazil

³Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia (UFBA), Rua Barão de Geremoabo, s/n, CEP: 40210-340, Salvador, BA, Brazil. E-mail: haki@gmx.at, lrogerio@ufba.br

⁴Departamento de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Avenida Ulysses Guimarães, n° 2862, CEP: 41213-000, Salvador, BA, Brazil. E-mail: eduardo.grissolia@cprm.gov.br

*Corresponding author. E-mail: leanize.oliveira@cprm.gov.br

In agricultural regions where there is insufficient rainwater for cultivation, understanding the dynamics of surface water and groundwater is critical to assess the impact of increased well pumping on the water balance. The western region of the state of Bahia-Brazil, the largest area of agribusiness in the state, has experienced progressive population growth since the 1980s, resulting in pressure on water resources - mainly after the introduction of irrigation - and conflicts among water users. This study analyzed the effects of groundwater extraction by wells in a portion of the Urucuia Aquifer System. The methodology used was the simulation of groundwater flow in steady-state for three scenarios: i) without withdrawal of water by pumping wells; (ii) with current withdrawal rates; and (iii) with 60% additional extraction. After defining well production rates from field surveys (4.6 m³ s⁻¹) and modeling of the aquifer base geometry (maximum thickness of 535 m), the

33 steady-state models with and without pumping show that, in the long term, groundwater
34 storage decreases by 2 km³ (0.8 m on average in the aquifer) without interference in the
35 regional flow direction. The mass balance shows that the base flow of the main rivers is
36 reduced by approximately 6% after current groundwater extraction and an additional 2.5%
37 after additional extraction. The results point to a greater impact on surface water caused by a
38 reduction in groundwater storage and related river base flow. This indicates the importance of
39 maintaining and expanding the groundwater-level monitoring network.

40 **Keywords:** base flow, numerical flow simulation, steady state.

41
42
43

44 **Análise dos efeitos a longo prazo da extração de água subterrânea** 45 **sobre o balanço hídrico em parte do Sistema Aquífero Urucuia na** 46 **Bahia – Brasil**

47 **RESUMO**

48
49 Em regiões agrícolas onde há insuficiência de chuva para o cultivo, entender a dinâmica das
50 águas, superficiais e subterrâneas, é fundamental para avaliar o impacto do crescente bombeio
51 de poços sobre o balanço hídrico. O Oeste do estado da Bahia-Brasil, maior área de
52 agronegócio do estado, experimenta uma progressiva ocupação a partir da década de 80,
53 ocasionando pressão sobre os recursos hídricos, principalmente após a introdução da
54 irrigação, e já apresentando conflitos entre usuários das águas. Objetivou-se neste trabalho,
55 analisar os efeitos da extração de águas subterrâneas por poços em uma porção do Sistema
56 aquífero Urucuia. A metodologia utilizada foi a simulação de fluxo hídrico subterrâneo em
57 regime estacionário para três cenários: i) sem bombeio; ii) com bombeio atual e; iii) com 60%
58 a mais de extração por poços. Após definição das vazões de produção dos poços atuais (4,6
59 m³ s⁻¹) e da modelagem da geometria da base do aquífero (espessura máxima de 535 m), os
60 modelos estacionários sem bombeio e com bombeio mostram que, a longo prazo, o

61 armazenamento de água subterrânea diminui em 2 km³ (rebaixamento médio no aquífero de
62 0.8 m) sem interferências na direção de fluxo regional. O balanço de massa mostra que o
63 fluxo de base dos rios principais é reduzido em aproximadamente 6% após a extração de água
64 subterrânea atual e mais 2,5% após acréscimo de extração. Resultados apontam para um
65 impacto maior sobre rios, causado por uma redução no armazenamento e fluxo de base. Os
66 estudos indicam a importância de manter e expandir a rede de monitoramento dos níveis
67 d'água.

68

69 **Palavras-chave:** fluxo de base, regime estacionário, simulação numérica de fluxo.

70

71

72 1. INTRODUCTION

73

74 Demand for fresh water is growing all over the world. It is estimated that agricultural
75 use accounts for about 70% of the water used on the planet and that this number will rise by
76 19% over the next 50 years (UNESCO, 2012). The intensive use of water in rural areas has
77 been increasing due to pressure for food crops and the production of other agricultural goods,
78 such as wood from reforestation and rubber. Brazil is the world's second largest exporter of
79 food, and water consumption for irrigation represents 68.4% of total demand (ANA, 2018).
80 Currently, the introduction of new agricultural techniques has contributed to increasing
81 productivity in the field, but despite the technological innovations the success of agricultural
82 activities is closely linked to the supply of water. Irrigated agriculture is the largest
83 component in regional water demand in the country and the potential for expansion is
84 believed to be 10 times greater than current usage (Ferrarini *et al.*, 2016). In agricultural areas,
85 groundwater (exploited by wells) and surface water together are the sources of supply for
86 small, medium and large irrigation systems. In this context, it is relevant to monitor the
87 demands of water and the states of aquifers in order to detect and avoid harmful effects

88 caused by sustained pumping, like severe groundwater depletion, as already reported for
89 various parts of the world (Werner *et al.*, 2013).

90 Consequently, in investigating the dynamics of groundwater flows of a given region, it
91 is relevant to measure the changes between the natural conditions and the post-pumping
92 conditions, thus enabling the evaluation of changes in the environment.

93 In Brazil, the large national agricultural frontier known as MATOPIBA (acronym
94 formed by the initial two letters of the states Maranhão, Tocantins, Piauí and Bahia) illustrates
95 the issue of sustainable use of water resources and agricultural occupation (Miranda *et al.*,
96 2014; Bragança, 2018). In the portion of MATOPIBA contained in the western region of
97 Bahia, an expanding agricultural frontier has emerged since the middle of the 1980s (Oliveira,
98 2015). It accounts for one-third of all agricultural wealth in Bahia (AIBA, 2018). Mechanized
99 agriculture occurs in this region, and is often irrigated using superficial and subterranean
100 water resources (Santos, 2016; Pousa *et al.*, 2019).

101 In the western region of the state of Bahia, this form of cultivation is present in the flat
102 areas of the Cerrado that border streams and rivers. In these areas, due to the occurrence of
103 rainfall in well-defined seasons, the development of the rainfed or irrigated cultivation is
104 boosting agribusiness. The water resources that meet this demand come from rainfall, river
105 waters and the Urucua aquifer (which has regional dimensions and extends from the south of
106 Piauí to the north of Minas Gerais), and are used for irrigation, the animal and human water
107 supply, and to compose the syrup for application of pesticides to the crops. These demands
108 lead to a growing concern about the sustainability of the system, and have recently generated
109 conflicts and manifestations among the local population, the agricultural sector and the energy
110 sector (due to the installation of small hydroelectric plants) (Saraiva, 2017; Nogueira, 2018).

111 The understanding of complex water systems, with temporal and spatial particularities,
112 requires the use of numerical modeling to simulate groundwater flow, especially when the

113 studied aquifer has regional dimensions (Anderson and Woessner, 1992). It is a widely
114 applied methodological tool, as it allows the characterization and understanding of the
115 dynamics of water circulation in the environment to simulate predictive scenarios of
116 exploitation, and to evaluate water availability. Results can be very useful in assisting
117 decision-makers and may help to settle disputes between water users. It is also known (Freeze
118 and Cherry, 1979) that the effects of pumping for short periods are more dependent on the
119 physical properties of the aquifer and the geometry of the well field, while for long term
120 analyses, the nature of the boundary conditions are more relevant. The numerical modeling
121 used in hydrogeological studies can investigate both aspects and consists of representing the
122 real world in the form of idealized conceptual models where computational packages allow
123 the resolution of differential equations of groundwater flow. This results in the calculation of
124 hydraulic heads in several points of the modeled area in one-, two- or three-dimensions. There
125 are many studies using such numerical models to evaluate groundwater abstraction and its
126 effects on river-aquifer interaction in different countries (Sanz *et al.*, 2011; Haque *et al.*,
127 2012; Switzman *et al.*, 2015; Sahoo and Jha, 2017).

128 In the case of the Urucuia aquifer, some work has already been carried out in order to
129 understand the groundwater flow dynamics from field data, using a classical methodology of
130 hydrogeological study and geophysical surveys (SRH, 2003; CPRM, 2008; 2019; Gaspar and
131 Campos, 2007). The main contributions are hydrogeological characterization in terms of
132 potentiometric maps, surveys of hydraulic parameters and qualitative aspects of the water.
133 Numerical models have also been applied, targeting questions in specific portions of it.
134 Schuster (2003a; 2003b) modeled the Cachorro and Fêmeas River Basins, aiming to define
135 granting criteria, using the finite difference method (FDM) PMWIN (Processing MODFLOW
136 for Windows) in a stationary and transient regime, and productive wells as observation wells.
137 In the same way, Schuster *et al.* (2010) only considered the transient regime in the Cachorro

138 River Basin. Engelbrecht and Chang (2015) and Gonçalves and Chang (2017) modeled the
139 Corrente and Grande River Basins using the stationary finite element method (FEM)
140 FEFLOW, but without considering the wells operating in the area.

141 Although studies have been carried out on the hydrogeology of our study region, some
142 important aspects of the understanding of the potential and availability of water resources
143 have not yet been investigated or are controversial, such as the discharge data of pumping
144 wells, thickness of the aquifer and the hydraulic interaction between surface water and
145 groundwater, which is highly important for the riverside population and for agribusiness.

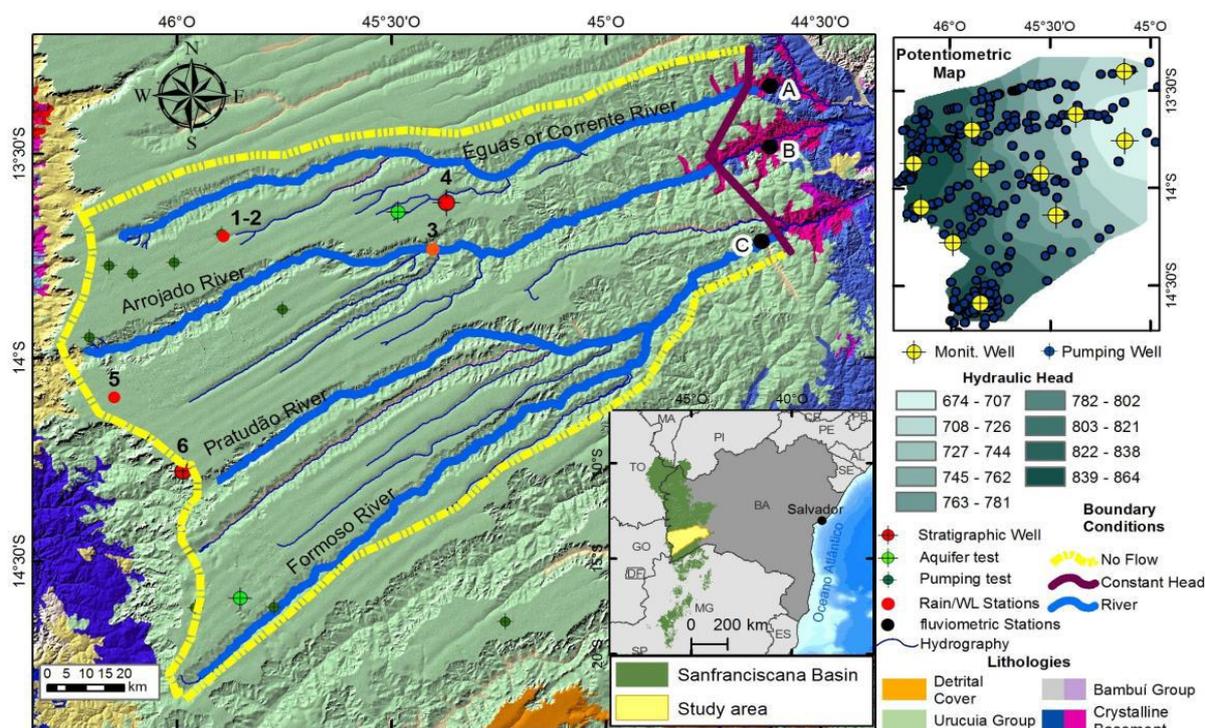
146 This work analyzes the effects of well pumping on the dynamics and storage of
147 groundwater and surface water in a regionally important part of the Urucuia aquifer. The
148 methodology consisted of: i) surveying the rate of pumping groundwater from the wells
149 registered in the study area; ii) modeling the geometry of the aquifer in light of the current
150 data; and iii) numerical modeling in steady state, using Visual Modflow, for three scenarios:
151 natural environment without pumping; with pumping under current conditions; and with
152 hypothetical pumping, including a 60% increase in the flow rate extracted in 60 new wells.
153 Results include the calibrated aquifer properties and the long-term effects of pumping on
154 groundwater storage, in addition to the quantification of pumping interference to the base
155 flow of the rivers.

156 **2. MATERIALS AND METHODS**

157 **2.1. Study area**

158 The study area is located in the extreme west of the state of Bahia - Brazil and covers
159 part of the Corrente River Basin (Éguas, Arrojado and Formoso sub-basins), which is a
160 tributary of the left margin of the São Francisco River, the main river of the state of Bahia. It
161 is bounded to the north, south and west by topographic dividers of the basins, and to the east
162 by outcrop limit of the Urucuia Group. It is located between the coordinates 44°08'18" and
163

164 46°17'52" W and 14°55'16" and 13°14'54" S, comprising a geographical area of 19,596 km²
 165 and covering the rural areas of the municipalities of Jaborandi and, partially, Correntina,
 166 Cocos and Coribe. The region represents about 16% of the entire outcrop area of the Urucuia
 167 aquifer that occurs along the Sanfranciscana Basin (Figure 1). The modeling area was defined
 168 based on the need to match known boundary conditions of the modeling domain, undergoing
 169 changes in the Eastern and Western margins, as described in more detail in Item 2.4.



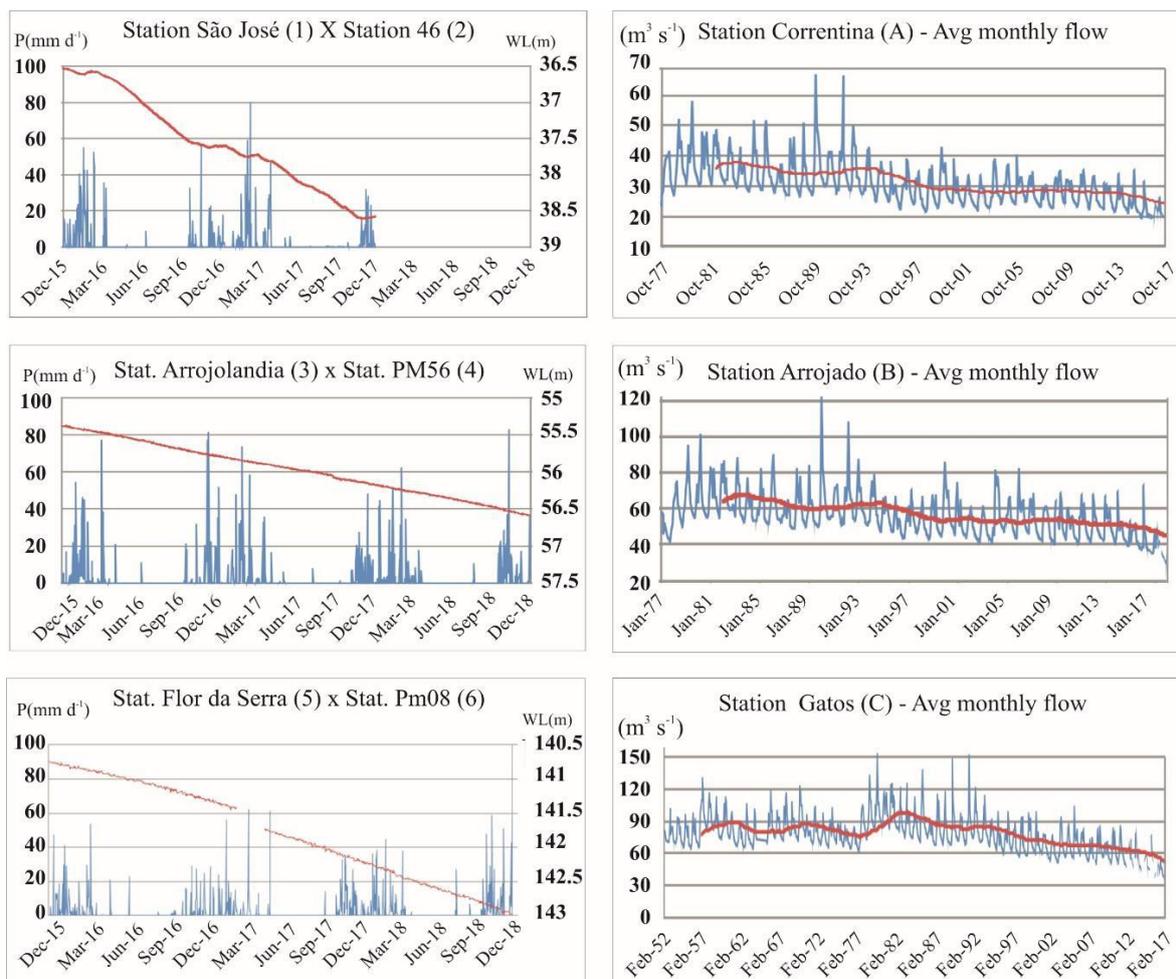
170
 171 **Figure 1.** Shaded relief geological map of the study area (adapted from CPRM, 2008), highlighting the area
 172 modeled with boundary conditions, climatological and groundwater observation stations, and stratigraphic
 173 wells. Inset is a map of the extent of occurrence of the Urucuia aquifer in the Sanfranciscana Basin.
 174 Potentiometric surface map with distribution of pumping and observation wells.
 175

176 The Urucuia aquifer is formed by very fine, fine and medium sandstones, well
 177 selected, with lenses of conglomerates in any stratigraphic position, and there are still
 178 discontinuous and dispersed silicified levels of the fluvial-eolian environment in the Neo
 179 Cretaceous formations of the homonymous group (Campos and Dardenne, 1997). In the study
 180 area, the substrate of the Urucuia Group consists of Neoproterozoic metasediments (pelites
 181 and calcarenites) of the Bambuí Group, Archaean/Proterozoic granitic-gneiss rocks and,

182 according to Campos and Dardenne (1994), glaciogenic sediments of Permian-Carboniferous
183 Santa Fé Group. In two stratigraphic wells made by the Geological Survey of Brazil (GSB) in
184 2013-2014 (CPRM personal communication, 2013), the Urucuia Aquifer System (UAS) has a
185 thickness of 206 m on the western border and 418 m in the north central portion, settling on
186 the Bambuí Group (the geological mapping applied is on a scale of 1: 250,000, Figure 1).

187 The hydrodynamic parameters of Urucuia were obtained from aquifer tests performed
188 by CPRM (2008) in two distinct points in the Éguas and Formoso River Basins, and the
189 values found were: effective porosities of 14% and 17%, transmissivities of $4.1 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
190 and $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, storage coefficients of 8.6×10^{-3} and 4.7×10^{-3} , horizontal hydraulic
191 conductivities of $1.7 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ and $6.9 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, vertical hydraulic conductivities of
192 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ and $8.1 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. The general flow direction is from south-west to north-
193 east; however, in the western portion, there is a groundwater divide in an approximate north-
194 south direction, which is not coincident with the topographic divide (Figure 1). Wells
195 monitored as of December 2015 demonstrate constant water-level declines, even after rainy
196 periods, with magnitudes varying from 0.56 to 2.86 m until 2018 (Figure 2).

197 The climate is classified as tropical with dry winter; rainfall decreases from west to
198 east and north to south, with values ranging from 1,200 to 1,000 mm year⁻¹, and monthly
199 maxima occurring from November to May, while lows occur from June to October. The
200 annual mean values of temperature and relative humidity are 24°C and 70%, respectively.



201

202 **Figure 2.** Variations of the water table in relation to precipitation in the region (the geographical
 203 position of the rainfall stations and wells are indicated by the corresponding numbers in Figure 1)
 204 and average monthly flows (blue) with 5-year moving averages (red) for each historical series in
 205 the pluviometric stations A- Correntina (Éguas River), B- Arrojado (Arrojado River) and C- Gatos
 206 (Formoso River).

207 Surface drainage is characterized by parallel- to subparallel river network, aligned
 208 according to generally N60E brittle structures, which carve a prairie, slightly sloping, with
 209 flattened top and altitudes ranging from 470 to 1016 m. According to Ramos and Silva
 210 (2002), the entire river basin contributes approximately 160 m³ s⁻¹ (of the minimum flows) to
 211 the São Francisco River, representing 15.6% of the total net discharge of the basin at Barra,
 212 São Francisco River.

213 The graphs of Figure 2 (A, B, C) represent the historical data of average monthly
 214 flows and average flows during 5-year periods of the Éguas, Arrojado and Formoso Rivers

215 (ANA, 2019), showing a continuous decline since the 90's. This can be potentially explained
216 by the decrease in rainfall (Pousa *et al.*, 2019) and by an increase in surface water intakes for
217 agricultural purposes, including irrigation (the flow-rate granted in 2017 was approximately
218 $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). The other charts in Figure 2 shows the groundwater levels (WL) with respect to
219 the ground surface (CPRM, 2019), compared to the rainfall (P) at the nearest station (ANA,
220 2019) (geographical position of the stations, see Figure 1).

221

222 **2.2. Pumping wells and monitoring data**

223 The preprocessing of the data was done in a Geographic Information System (GIS)
224 environment using the ArcMap 10.2 program from ArcGis, where geological, geophysical,
225 hydroclimatic and productive wells and monitoring data could be georeferenced. For the
226 registered wells, data were obtained during field campaigns from this research, identified
227 from the internal reports of the GSB (CPRM, 2008), and including data collection directly
228 from landowners, drilling and granting data provided by the Institute of Environment and
229 Water Resources (INEMA). The information obtained includes the geographic positioning of
230 wells, the lithological and/or constructive profiles and the discharge data. For the majority of
231 the wells, the rates of abstraction were inferred from the use or purpose of the property.

232 Data from eleven monitoring wells were obtained from the GSB Rede Integrada de
233 Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), where data loggers were installed from
234 September 2015; however, not all have the same historical series, either because they started
235 operating on different dates or because the reading was stopped for different reasons. The
236 installed sensors (dipperlog and barlog) are HERON-branded and have been programmed to
237 record barometric pressure and water-level depth data every hour. These wells served as
238 observation wells for calibration in the simulations performed.

239 The increase of simulated pumping wells in scenario three is justified due to the
240 economic potential of the region to develop agribusiness in irrigated areas.

241 **2.3. Geometry of the aquifer**

242 The thickness of the Urucua aquifer is not yet a consensus in the literature, with
243 maximum values between 300 m (ANA, 2013) and 1000 m (Bomfim and Gomes, 2004).
244 Since it is a regional aquifer, the modeling of the aquifer base geometry, prior to flow
245 simulation, was essential in the attempt to minimize errors. The geological modeling process
246 of the Urucua aquifer base was performed in Strat3D software (Version 2.1.75.0), that
247 creates strata block tri-dimensional prism models. It started with the insertion of the database
248 into the program environment, informing the spatial position of each drill hole (in this case,
249 tubular well), as well as the height of the hole; lithology, stratigraphic unit and other
250 descriptive characteristics of the lithological intervals of each hole and correlations were
251 determined from the interpretations made by the software. The data inserted in the modeling
252 of the base of the aquifer were: 2 stratigraphic wells; RIMAS network wells, tubular wells
253 with lithological profile; 129 points of basement outcrops and basement/crystalline contact;
254 and 12 virtual holes from scientific articles and seismic data from the area.

255 The next step was the definition of the stratigraphic order of the sedimentary packages
256 according to the geological knowledge of the region and scientific works.

257 The arrangement of the data in 3D format allowed the visualization of the holes side
258 by side through vertical sections, allowing the correlation between the strata recorded in
259 each well. For the construction of the three-dimensional geological models, the Strat3D
260 uses two distinct interpolators, one for the thickness and the other for the surfaces,
261 generating top and base surfaces for each of the correlated layers. In this study, the nearest
262 neighbor interpolation was used for both situations. The cell size used was 500 m
263 horizontally and 10 m vertical. The closure of the solids was done based on the method of
264 the areas of influence of each hole, which extends up to half the distance that separates it
265 from the surrounding wells and also within the limits of established structural faultings.

266 The generated geological models were based on the digital elevation model obtained from
267 the Topographic Radar Shuttle Mission (TRSM) image, with a resolution of 30 m.

268 **2.4. Numerical model**

269 According to Anderson and Woessner (1992), numerical models are used to represent
270 the complexities of the physical environment, especially in situations where the application of
271 analytical solutions is considered simplistic and inappropriate.

272 Among the numerical methods applied in groundwater modeling, the method used in
273 this work (FDM) is to approximate the modeled area as a finite difference grid, where lines
274 and columns define the grid of the model. Thus, in an iterative process, the differential
275 equations of flow are processed, and the hydraulic heads are calculated. The code used was
276 the Modular-Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow (MODFLOW),
277 developed by the U.S. Geological Survey (Harbaugh *et al.*, 2000; McDonald and Harbaugh,
278 1988) using VisualModflow software, V.4.1. The Solver applied to run the program was the
279 WHS, for unconfined aquifers, using the default convergence parameters.

280 The grid discretization was 182 rows by 267 columns, resulting in 48,594 active cells,
281 with widths ranging from 380 x 380 m to 780 x 780 m and the greatest refinement in the areas
282 near the pumping and observation wells. The grid cells outside the model boundaries are
283 assigned as inactive cells, such that they are not used in calculating head.

284 The boundary conditions were as follows: no flow (Newman) lower boundary
285 representing impervious aquifer base; constant head (Dirichlet) eastern boundary representing
286 iso piezometric line at 627 m; no flow northern and southern boundaries representing
287 topographic divides; no flow western boundary representing a groundwater divide; and head
288 dependent flux boundaries (Cauchy) representing the Éguas, Arrojado, Pratudão and Formoso
289 Rivers (Figure 1).

291 Aquifer recharge was conceived in four zones based on average measured rainfall at
292 available stations and resulting isohyets (Bahia, 1998). For each zone, recharge was estimated
293 as 17% (based on Meyboom method, CPRM, 2008) of the annual mean precipitation, giving
294 values of 176 to 208 mm year⁻¹.

295 The hydraulic conductivity of the aquifer and river conductance were used as
296 calibration parameters with respect to observed hydraulic heads. In the calibration process,
297 hydraulic conductivity was varied from 10^{-7} to 10^{-4} m s⁻¹ which is the range of values
298 observed in aquifer tests performed in the study area and in the nearby northern Urucua
299 aquifer (Gaspar, 2007; CPRM, 2008). Data on riverbed geometry and conductivity per cell
300 are not available. Alternatively, we decided to use conductance as a second calibration
301 parameter whose value was varied from 0.0058 m² s⁻¹ to 1.1 m² s⁻¹. These limits
302 approximately correspond to the extreme situations, where the rivers are effectively
303 disconnected from and perfectly connected to the aquifer, respectively. The same
304 conductance is justified because the rivers of the region have similar physiographic features
305 and the vertical hydraulic conductivity of the riverbed must be very close in all its length
306 due to the homogeneity of the geology.

307 Three steady-state scenarios are considered for numerical simulation: i) the natural
308 hydrological system, without anthropic influence of pumping wells; (ii) including wells
309 operating at current (2017) withdrawal rates; and (iii) with a fictitious pumping scenario of
310 60 additional wells at a flow rate of 4000 m³ day⁻¹ (60% increase over current pumping)
311 spaced throughout the modeled area, but maintaining a minimum distance of 5 km from
312 other wells and more than 2 km from the rivers.

313 Overall, the modeled aquifer system receives water inflow from recharge due to
314 spatially distributed precipitation, in addition to infiltration from limited river portions.

315 Outflow consists of well extraction, leakage into rivers and the underground flow across the
316 eastern constant head boundary.

317 It is important to highlight the assumptions and limitations of the model: i) The zero-
318 flow assumption at the base of the layer is based on geological studies and geophysical
319 surveys, but there may be some location in the basin where the lithopost Bambui Group
320 lithology allows hydraulic connection to the Urucuia aquifer; ii) there is a low degree of
321 uncertainty in the value and positioning of the boundary condition constant head, which was
322 obtained from potentiometric maps made between 2005 and 2009; iii) terrain elevation data
323 are satisfactory for regional analysis; iv) the aquifer is considered regionally unconfined, but
324 non-mappable silicified sandstone facies can occur locally, giving the aquifer a confined or
325 semi-confined character; and v) the observed aquifer heads (e.g. Figure 2) are highly transient
326 and average heads are used for calibration of the present steady-state model.

327

328 **3. RESULTS AND DISCUSSION**

329

330 **3.1. Survey of pumping well rates**

331 Among the 323 registered wells in the study area, 282 are contained inside the modeling
332 domain. It is observed that only about 30% of the wells have a grant (data up to 2016).
333 Among the wells granted, 52% are for irrigation, 22% for human supplies, 12% for animal
334 husbandry, 7% for industrial use, and 5% for public use. The irrigated crops are bermuda
335 grass, cotton, beans, corn, coffee and soybeans.

336 Table 1 presents the main characteristics of the pumping- and observation wells, and
337 Figure 1 shows the distribution of the wells in the study area.

Table 1. Data from wells surveyed and included in the model.

Well	Depth (m)			WL (m)			Q (m ³ h ⁻¹)			Q _s (m ³ h ⁻¹ m ⁻¹)		
	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
Pumping Wells (323)	30	126	290	17	64	150	1	29	560	0.97	12.97	48.68
Monitoring Wells (11)	68	114	180	36	73	138	8.5	11	13.2	0.53	2.32	6.29

*WL= Water level below local ground surface; Q= Pumping Rate; Q_s= Specific capacity (ratio between pumping rate and drawdown).

338

339 The sum of the pumping rates at all wells in the study area for 2017 was 4.61m³ s⁻¹

340 (3.37 m³ s⁻¹ for the modeled area), and it is observed that 26.8% of the water exploited by the

341 wells is positioned in the portion of the aquifer that drains to the West and not considered

342 herein. The highest-flow wells are generally wells for irrigation and are granted to exploit

343 between 20 to 500m³ h⁻¹ for 4 to 24h day⁻¹ (representing about 20% of the wells granted).

344 It is important to emphasize the need for implementation and access to continuous

345 measurements of water levels and flow rates in production wells, especially where extraction

346 rates are large.

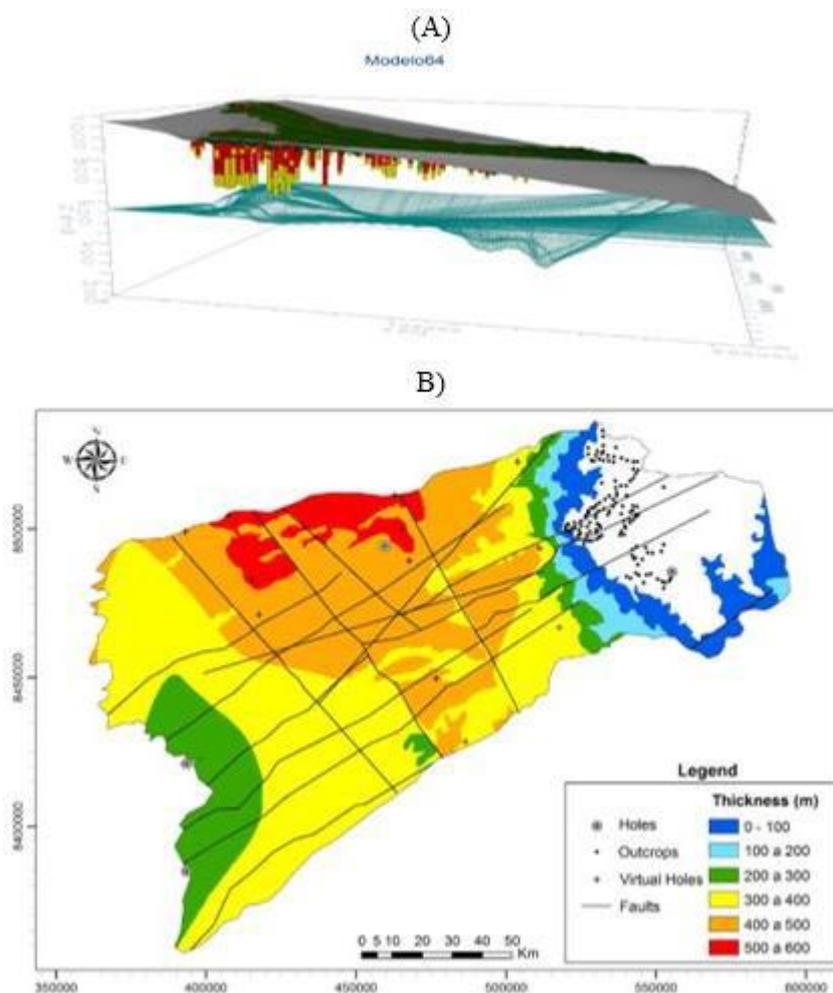
347 **3.2. Geometry of the aquifer (base mapping)**

348 The result of the geometric modeling of the Urucuia aquifer allows identifying a

349 sedimentary basin of intracontinental “sag” type with small subsidence (maximum thickness

350 of approximately 500 m). Figure 3 contains two different representations to illustrate the

351 thickness of the Urucuia aquifer.



352

353 **Figure 3.** A) 3D model of the UAS base (green surface) with the productive
 354 tubular wells (yellow/red), 60x vertical exaggeration. B) Map of thickness of
 355 Urucua aquifer.

356 It is noticed that the surface of the UAS base presents a greater thickening in the
 357 western border in relation to the east border, and tends to be thicker in the north center portion
 358 (Figure 3).

359 The thicknesses of the modeled aquifer represents the UAS, consisting of sedimentary
 360 rocks, predominantly sandy, with small-scale lithological heterogeneities (silicified zones,
 361 pelitic and/or conglomerate horizons). These discontinuities are considered to be negligible
 362 for the regional flow dynamics, such that the system is defined here regionally as a single
 363 isotropic and homogeneous hydrostratigraphic unit with thicknesses ranging from 160 to 535
 364 m. There is no evidence that failure systems can form hydraulic flow barriers.

3.3. Aquifer modeling: Flow simulation and mass balance

The calibration process consisted in varying the river conductance and hydraulic conductivity, in order to obtain the best hydraulic head distribution in terms of smallest differences between simulated (using 2017 pumping scenario) and observed hydraulic heads at 11 observation wells, considering the Root Mean Squared (RMS) Normalized (%) values as an evaluation parameter (modeling quality indicator). Table 2 shows the RMS residuals for the three simulated pumping scenarios.

Table 2. Calculated RMS and correlation coefficients for the three simulations. Scenario 1 (Without pumping); Scenario 2 (with current pumping) and Scenario 3 (current pumping increased by 60%).

	Scenario 1		Scenarios 2 and 3	
Number of observation wells	11	9	11	9
RMS (m)	25.6	18.0	25.6	18.3
Normalized RMS (%)	14.7	10.3	14.7	10.5
Correlation Coefficient (%)	95.3	98.5	94.6	98.1

The values of RMS are closer to the acceptable value in the literature (10%) when the PM08 (Prata Farm) and PM54 (Assentamento) monitoring wells are removed from the evaluation, and present fairly close values for the two situations. Possibly the largest sources of inaccuracy are related to terrain altimetry data in the discretized grid of the model.

The values presented are the result of the simulations with the calibrated parameters of hydraulic conductivity of 6×10^{-4} m s⁻¹ and conductance of 2.3×10^{-2} m² s⁻¹. The calibration process showed that model performance is more sensitive to the hydraulic conductivity and less sensitive to the river conductance values.

With these calibrated values, the simulations with and without pumping were run using the same recharge rate of 87.15 m³ s⁻¹, resulting in the partitioning of the other components of the water balance, according to Table 3. It is observed that the rivers are predominantly discharge zones, with base flow in the range of 85 m³ s⁻¹, approximately 68% of the sum of the three rivers' minimum discharges.

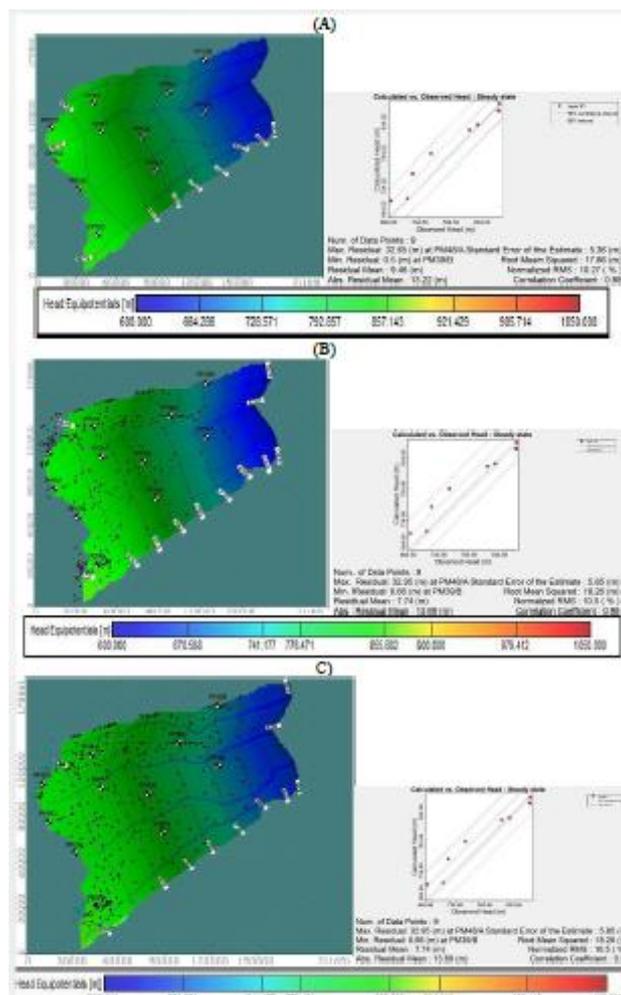
Table 3. Mass balances of the simulations with and without pumping.

	Inflow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)			Outflow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	
	Recharge	River leakage	Pumping well	River leakage	Constant Head
Without Pumping	87.15	28.28	0	89.54	25.86
Current Pumping (2017)	87.15	26.44	3.37	83.91	26.30
Fictitious Pumping	87.15	27.02	5.4	81.80	26.22

386
387

388 It should be noted that the simulated mass balances do not include anthropogenic withdrawals
389 of surface waters. The mass balances still show that the base-flow of the three main rivers in
390 the study area decreases from $89.54 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in the non-pumping situation to $83.91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ with
391 current pumping (approximately 6% reduction due to pumping).

392 The maps presented in Figure 4 show the distributions of hydraulic heads, that is, the
393 potentiometric maps for the three simulations. The main flow direction is SW-NE, with
394 drainage (main rivers) acting as discharge area of the aquifer, being more pronounced in the
395 Arrojado and Formoso Rivers. The potentiometric map in the current pumping situation
396 presents overall features very close to the natural situation. However, in the western region
397 there is a displacement of the potentiometric curve of 840 m to the north and 870 m to the
398 south.

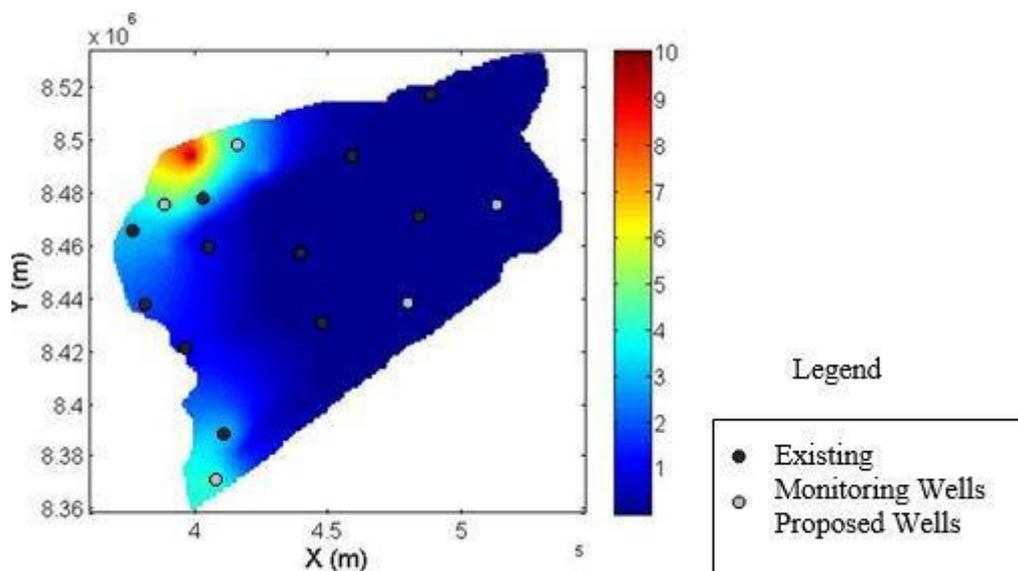


399
400
401
402
403
404
405
406
407

Figure 4. Potentiometric maps with groundwater flow from simulations and their respective graphs of of observed- versus simulated hydraulic heads: A) no pumping; B) with pumping, relative to the year 2017; C) fictitious well pumping increased by 60%.

Figure 5 provides a better view of the drawdown due to pumping by showing the differences between hydraulic heads without and with pumping in 2017. Regions with high pumping rates are correctly identified as the most-impacted (green to red). Based on this map, we calculated an average aquifer drawdown of 0.8 m. Considering an average effective porosity of 15%, this corresponds to a variation of groundwater storage volume (depletion) between stationary conditions without pumping and with pumping of approximately 2.0 km³.

408
409
410
411
412
413



414
415
416
417
418
419

Figure 5. Map of hydraulic head differences (drawdown) without and with pumping (base year 2017). Monitoring well and additional monitoring wells proposed at approximate locations where data is scarcest and/or drawdown are largest.

420 There will probably be an expansion of the network of productive wells in the region,
421 due to socioeconomic and land-use characteristics of the area. This reinforces the importance
422 of continuous monitoring of water levels at monitoring wells for compiling more-complete
423 historical series of data to update and expand existing modeling studies.

424 A well-designed network of monitoring wells may also provide information towards
425 defining boundary conditions (hydraulic heads) for the modeling of smaller areas with greater
426 accuracy. New observation wells positioned at the approximate locations shown in Figure 5
427 are suggested to improve the network monitoring in areas where data is scarcest (lowest level
428 of information) and areas where drawdowns are largest (highest impact). Moreover,
429 monitoring wells can also be installed at the western border of the modeled area to better
430 define the groundwater divider.

431

432 **4. CONCLUSIONS**

433

434 The simulation of flow and the mass balance from numerical modeling proved to be a
 435 useful tool to quantify the interference of pumping activities in hydrological systems in
 436 general.

437 In the hydrographic basins that correspond to the modeled area of the present study,
 438 the results demonstrate that the aquifer does not suffer significant variations in the main
 439 direction of regional flow due to the pumping; however the unequal distribution of the wells
 440 and the concentration of high flow wells in some points can contribute to localized flow
 441 inversions.

442 The effects of groundwater extraction on river base flows are due to decreasing
 443 groundwater storage and the related regional drawdown. This emphasizes the importance of
 444 continuous monitoring of aquifer water levels and well-pumping rates as well as a continuous
 445 updating of hydrological modeling efforts to maintain sustainable agricultural development.
 446 The study of the transient-state simulation of the study area is suggested.

447

448 5. REFERENCES

449

450 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Sistema Nacional de Informações sobre**
 451 **Recursos Hídricos**. Brasília, 2019. Available at:
 452 http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Access: 21
 453 Jan. 2019.

454 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estudos hidrogeológicos e de**
 455 **vulnerabilidade do sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão**
 456 **integrada e compartilhada**. Brasília, 2013. v. 1. 72p.

457 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no**
 458 **Brasil 2018**: informe anual. Brasília, 2018. 72p. Available at:
 459 [www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2018.pdf)
 460 [hidricos/informe-conjuntura-2018.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2018.pdf). Access: 21 Jan. 2019.

461 ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGANTES DA BAHIA. **Anuário da Safra do**
 462 **Oeste Baiano 2017/2018**. Barreiras, 2019. Available at: [http://aiba.org.br/wp-](http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Anuário-2019-Português-Digital.pdf)
 463 [content/uploads/2019/06/Anuário-2019-Português-Digital.pdf](http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Anuário-2019-Português-Digital.pdf). Access: 02 Aug. 2019.

464 ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling**: simulation of
 465 flow and advective transport. San Diego: Academic Press, 1992. 381p.

- 466 BAHIA. SEI. **Análise dos atributos climáticos do Estado da Bahia**. Salvador, 1998. 85p.
- 467 BOMFIM, L. F. C.; GOMES, R. A. D. Aquífero Urucuia: Geometria e espessura: ideias para
468 discussão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 2004,
469 Cuiabá-MT. **Anais [...]** Cuiabá: ABAS, 2004.
- 470 BRAGANÇA, A. The economic consequences of the agricultural expansion in MATOPIBA.
471 **Revista Brasileira de Economia**, v. 72, n. 2, 2018. [http://dx.doi.org/10.5935/0034-](http://dx.doi.org/10.5935/0034-7140.20180008)
472 7140.20180008
- 473 CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. A glaciação Neopaleozóica na porção meridional da
474 Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v.24, n.2, p.65-76, 1994.
- 475 CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia
476 Sanfranciscana: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v.27, n.3, p.269-
477 282, 1997.
- 478 CPRM. **Hidrogeologia do aquífero Urucuia - Bacias dos Rios Arrojado e Formoso,**
479 **Bahia**. Brasília: CPRM/UFBA/FINEP, 2008. 1 CD-ROM.
- 480 CPRM. **RIMAS**. Brasília, 2019. Available at:
481 http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php?rimas=true. Access: 22
482 May 2019.
- 483 ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Simulação numérica de fluxo de águas do Sistema
484 aquífero Urucuia na Bacia Hidrogeológica do rio Corrente (BA). **Revista Águas**
485 **Subterrâneas**, v.29, n.2, p.244-256, 2015. <https://doi.org/10.14295/ras.v29i2.28435>
- 486 FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.
487 604p.
- 488 GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de**
489 **Geociências**, v.37, n.4, p.216-226, 2007.
- 490 GONÇALVES, R. D.; CHANG, H. K. Modelo Hidrogeológico do aquífero Urucuia na bacia
491 do rio Grande (BA). **Revista Geociências**, v.36, n.2, p.205-220, 2017.
492 <http://orcid.org/0000-0002-3088-1000>
- 493 FERRARINI, A. D. S. F.; FERREIRA-FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. Water demand
494 prospects in Brazil: a sectoral evaluation using an inter-regional CGE MODEL1. *In*:
495 ANNUAL CONFERENCE ON GLOBAL ECONOMIC ANALYSIS, 19., 2016,
496 Washington. **Conference Paper[...]** Washington: Gtap, 2016.
- 497 HAQUE, M. A. M.; JAHAN, C. S.; MAZUMDER, Q. H.; NAWAZ, S. M. S.; MIRDHA, G.
498 C.; MAMUD, P.; ADHAM, M. I. Hydrogeological condition and assessment of
499 groundwater resources using visual modflow, modeling, Rajshahi City Aquifer,
500 Bangladesh. **Journal of the Geological Society of India**, v.79, n.1, p.77-84, 2012.
501 <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0001-7>
- 502 HARBAUGH, A. W.; BANTA, E. R.; HILL, M. C.; McDONALD, M. G. **Modflow-2000,**
503 **The U.S. Geological Survey modular groundwater model – User Guide to**

- 504 **Modularization concepts and the groundwater flow process.** Washington: USGS,
505 2000. 130p.
- 506 McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference**
507 **groundwater flow model.** Reston: USGS, 1988. 586p.
- 508 MIRANDA, E.; MAGALHÃES, L.; CARVALHO, C. A. **Proposta de delimitação**
509 **territorial do MATOPIBA.** Campinas: Embrapa, 2014. Available at:
510 https://www.embrapa.br/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf. Access: 7
511 May 2019.
- 512 NOGUEIRA, D. Brasil tem um conflito por água praticamente a cada dois dias. **O Globo**, Rio
513 de Janeiro, 2018. Available at: [https://oglobo.globo.com/brasil/brasil-tem-um-conflito-](https://oglobo.globo.com/brasil/brasil-tem-um-conflito-por-agua-praticamente-cada-dois-dias-22509460)
514 [por-agua-praticamente-cada-dois-dias-22509460](https://oglobo.globo.com/brasil/brasil-tem-um-conflito-por-agua-praticamente-cada-dois-dias-22509460). Access: 5 May 2019.
- 515 OLIVEIRA, M. A. B. **Do Sertão São Francisco ao Oeste na Bahia:** uma análise da trajetória
516 de políticas do Estado no processo de formação territorial (1889-2014). 2015. 262f.
517 Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,
518 Salvador, 2015.
- 519 POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.;
520 CASTRO, M. Climate change and intensive irrigation growth in western Bahia, Brazil:
521 the urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v.11, n.5, p.933, 2019.
522 <https://doi.org/10.3390/w11050933>
- 523 RAMOS A. M.; SILVA F. F. Contribuição dos mananciais superficiais do Estado da Bahia
524 para o Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO
525 NORDESTE, 6., 2002, Maceió-AL. **Anais[...]** Maceió: ABRH, 2002. 1 CD-ROM.
- 526 SAHOO, S.; JHA, M. K. Numerical groundwater flow modeling to evaluate potential effects
527 of pumping and recharge: implications for sustainable groundwater management in the
528 Mahanadi delta region, India. **Hydrogeology Journal**, v.25, n.8, p2489-2511, 2017.
529 <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1610-4>
- 530 SANTOS, C. D. Difusão do agronegócio e reestruturação urbano-regional no Oeste Baiano.
531 **Geotextos**, v.12, n.1, 2016. <http://dx.doi.org/10.9771/1984-5537geo.v12i1.15381>
- 532 SANZ, D.; CASTAÑO, S.; CASSIRAGA, E.; SAHUQUILLO, A.; GÓMEZ-ALDAY, J.;
533 PEÑA, S.; CALERA, A. Modeling aquifer–river interactions under the influence of
534 groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). **Hydrogeology**
535 **Journal**, v.19, n.2, p.475-487, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0694-x>
536
- 537 SARAIVA, R. Guerra pela água em Correntina se arrasta desde 2015. **Correio 24 Horas**,
538 Salvador, 2017. Available at: [https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/guerra-](https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/guerra-pela-agua-em-correntina-se-arrasta-desde-2015/)
539 [pela-agua-em-correntina-se-arrasta-desde-2015/](https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/guerra-pela-agua-em-correntina-se-arrasta-desde-2015/). Access: 6 May 2019.
- 540 SCHUSTER, H. D. M. **Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição de**
541 **parâmetros para outorga de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do Rio**
542 **do Cachorro:** oeste do Estado da Bahia. Salvador: [S.n], 2003a. 125p.

- 543 SCHUSTER, H. D. M. **Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição do**
544 **distanciamento entre poços e mananciais no Oeste Baiano: Relatório Final.**
545 Salvador, DMG/UFCG/CCT, 2003b. 42p.
- 546 SCHUSTER, H. D. M.; CRUZ, J. L. F.; SILVA, F. F. Modelagem do efeito de bombeamento
547 na depleção de rios. Parte 2: simulações de um caso real no Oeste da Bahia. *In:*
548 SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza-CE.
549 **Anais[...]** Fortaleza: ABRH, 2010. 1 CD-ROM.
- 550 SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA. **Uso**
551 **Conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas -**
552 **Bahia.** Salvador: SRH, 2003. 166p.
- 553 SWITZMAN, H.; COULIBALY, P.; ZAFAR, A. Modeling the impacts of dryland
554 agricultural reclamation on groundwater resources in Northern Egypt using sparse data.
555 **Journal of Hydrology**, v.520, p.420-438, 2015.
556 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.064>
- 557 UNESCO. Global water resources under increasing pressure from rapidly growing demands
558 and climate change: according to new UN World Water Development Report. *In:*
559 UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT. **Programme[...]** Washington,
560 2012. WWDR4 – Background Information Brief. Available at:
561 [http://www.unesco.org/new/fileadmin/multimedia/hq/sc/pdf/WWDR4%20Backgroun](http://www.unesco.org/new/fileadmin/multimedia/hq/sc/pdf/WWDR4%20Background%20Briefing%20Note_ENG.pdf)
562 [d%20Briefing%20Note_ENG.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/multimedia/hq/sc/pdf/WWDR4%20Backgroun). Accessed on: 22 jan. 2019.
- 563 WERNER, A. D.; ZHANG, Q.; XUE, L.; SMERDON, B. D.; LI, X.; ZHU, X.; YU, L.; LI, L.
564 An initial inventory and indexation of groundwater mega-depletion cases. **Water**
565 **Resources Management**, v.27, n.2, p.507-533, 2013. [https://doi.org/10.1007/s11269-](https://doi.org/10.1007/s11269-012-0199-6)
566 [012-0199-6](https://doi.org/10.1007/s11269-012-0199-6)
- 567
- 568
- 569
- 570
- 571
- 572
- 573
- 574
- 575
- 576
- 577

CAPÍTULO 3**ARTIGO 2**

Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia**Transient water balance of the Southern Urucuia aquifer in Bahia****Resumo**

A mensuração dos componentes do balanço hídrico de uma bacia do ponto de vista temporal e espacial é extremamente relevante na gestão dos recursos hídricos e no entendimento das flutuações de níveis da água subterrânea. O aquífero Urucuia vem sendo monitorado por dataloggers instalados em poços dedicados que mostram um declínio contínuo nos níveis d'água atingindo até 1,1m/ano. Foi realizada a análise isotópica em conjunto com a simulação numérica de fluxo em estado estacionário e transiente na porção meridional do aquífero Urucuia-Bahia (23% da área aflorante total) para descrever a dinâmica dos componentes do balanço hídrico entre 2005 e 2018. A análise isotópica evidencia a interação rio-aquífero e o efeito da evapotranspiração na recarga. Os resultados mostram diminuição progressiva da recarga entre 2012 e 2017, sendo fortemente influenciada pela evapotranspiração e diminuição das chuvas, causando o declínio nos níveis d'água subterrâneos e do fluxo de base dos rios, também influenciado pelo bombeamento dos poços. Adicionalmente o modelo numérico foi desenvolvido para gerar respostas degrau a uma diminuição de recarga em 10% mostrando que cargas hidráulicas e fluxos de base tardam aproximadamente uma década para se reequilibrarem. Os resultados evidenciam a importância de monitoramento hidroclimatológico contínuo e

602 mensuração das retiradas, visando acompanhar a dinâmica entre demandas e
603 disponibilidades hídricas.

604

605

Abstract

606 Quantification of the temporally and spatially variable water balance components in a
607 catchment is extremely relevant for the management of water resources and the
608 understanding of fluctuations in groundwater levels. The Urucuia aquifer has been
609 monitored by dataloggers installed in dedicated wells and shows a continuous
610 decline in water levels reaching up to 1.1m/year. Isotopic analysis was performed in
611 conjunction with steady-state and transient flow simulation in the southern portion of
612 the Urucuia aquifer (23% of total area) to describe the dynamics of the water balance
613 components between 2005 and 2018. The isotopic analyses were fundamental for
614 the construction of the conceptual model indicating river-aquifer interaction and the
615 effect of evapotranspiration on recharge. Results show that recharge decreased
616 progressively between 2012 and 2017, being strongly influenced by
617 evapotranspiration and diminishing rainfall, causing a decline in groundwater levels
618 and river base flows, also influenced by pumping wells. The numerical model was
619 further used to compute step responses to a 10% drop in recharge, indicating that
620 hydraulic heads and river base flows re-equilibrate after approximately one decade. It
621 is highlighted that continuous hydroclimatological monitoring and withdrawals
622 measurements to observe the dynamics between water demands and availability are
623 important.

624

625 **Palavras-chave:** aquífero Urucuia; simulação transiente; análise isotópica.

626 1. INTRODUÇÃO

627 Altas demandas de água da população estão conduzindo a depleção de
628 aquíferos em muitos locais do planeta (LE BROCCQUE et al., 2018; WADA, 2016).
629 Werner et al. (2013) comparou os casos de declínio dos níveis d'água em diversos
630 aquíferos e considerou que os cinco maiores casos de depleção estão na Planície
631 do rio Hai-China, Altiplano-Espanha, Bacia do México-México, Bacia do rio Huang-
632 China e Vale Central da Califórnia-EUA, com declínios variando entre 1-10m/ano. No
633 Brasil, o mesmo estudo cita apenas o aquífero Guarani ocupando o quadragésimo
634 lugar no ranking.

635 A depleção é conceituada como declínio a longo prazo no armazenamento de
636 água subterrânea e pode gerar efeitos indesejáveis como a subsidência do solo,
637 intrusão de água salina em aquíferos costeiros, seca de fontes, redução de vazão de
638 cursos d'água, desaparecimento de nascentes de rios, desequilíbrio de
639 ecossistemas ribeirinhos, alterações na qualidade da água. Outra consequência é a
640 necessidade de aprofundamento dos poços para captação de água que se reverte
641 em um custo maior para perfuração e bombeamento.

642 Sob condições naturais, sem bombeio, os aquíferos estão em estado de
643 equilíbrio dinâmico, com a taxa média de recarga natural igual à taxa média de
644 descarga natural. Desequilíbrios temporários tendem a se reequilibrar após um ciclo
645 climático, com diminuição da descarga natural e/ou perdas no armazenamento e/ou
646 variações na recarga. No entanto, descargas adicionais contínuas (e.g. extração por
647 poços) levam o sistema hídrico a equilíbrios diferentes implicando diminuição da
648 descarga natural e/ou perdas no armazenamento (THEIS, 1940).

649 Localmente, o bombeamento induz um gradiente hidráulico na direção do poço,
650 formando o cone de depressão no seu entorno, com componentes horizontais e

651 verticais de fluxo (em aquíferos livres). Com a continuidade do processo, o cone
652 migra e uma porção maior do aquífero estará contribuindo com água para o poço,
653 até atingir zonas de descarga ou recarga, alterando assim o seu comportamento
654 (FETTER, 2001). A geometria e dinâmica desse cone dependem das características
655 físicas do meio, presença de barreiras hidráulicas, taxas de bombeamento e
656 afastamento entre os poços, caráter da recarga, e distância dos poços ao local de
657 descarga natural.

658 A exploração em períodos curtos é mais dependente das propriedades
659 hidráulicas do aquífero e da disposição geométrica dos campos de poços, mas para
660 períodos mais longos a natureza dos contornos do sistema hídrico controla a
661 produção dos aquíferos (FREEZE e CHERRY, 1979). As flutuações dos níveis de
662 água (NA) subterrâneos são o resultado de processos como mudanças do volume
663 de água armazenada no aquífero (recarga por infiltração de chuva e rios, influência
664 de poços vizinhos, áreas de irrigação), mudanças na pressão atmosférica e
665 mudanças causadas por deformação do aquífero (efeitos de maré ou terremotos).
666 Alguns autores consideram que a exploração de aquíferos deve ser norteada pela
667 sustentabilidade ambiental do sistema hídrico no sentido de equilibrar as condições
668 de bombeio à mitigação de suas consequências (MAIMONE, 2004; ZHOU, 2009;
669 CHAMINÉ, 2015).

670 A investigação da dinâmica do NA subterrâneo e a quantificação dos
671 componentes do Balanço Hídrico (BH), considerando inclusive as saídas artificiais
672 por bombeio de poços, é complexa e fundamental para evitar subjetividades na
673 análise da sustentabilidade do uso dos recursos hídricos. Na literatura encontram-se
674 estudos baseados em modelos matemáticos com soluções analíticas ou numéricas
675 (FISHER et al., 2016; OU et al., 2018), além de redes neurais (GUZMAN et al., 2017;

676 MOHANTY et al., 2013) que investigam aspectos como as relações entre água
677 subterrânea, água superficial, disponibilidades hídricas, variabilidades da recarga,
678 entre outros.

679 Dentro desse contexto, a modelagem de aquíferos visando simulação de fluxo
680 transitório é uma ferramenta extremamente válida, pois permite avaliar o balanço de
681 volume d'água do sistema em seus diversos componentes baseado em princípios
682 físicos e de forma espacialmente distribuída.

683 No Brasil, um dos principais problemas para análises temporais de sistemas
684 hídricos subterrâneos está relacionado à base de dados históricos que costuma ser
685 escasso e não sistemático. Contudo, na região Oeste da Bahia, o aquífero Urucuia
686 vem sendo monitorado pela CPRM-Serviço Geológico do Brasil por meio de 62
687 poços dedicados (em toda a sub-bacia Urucuia) que acompanham as variações de
688 NA desde 2011 e apresentam rebaixamento médio de 2,5m, com valores máximos
689 de 6,67m desde o início da implantação da rede.

690 Neste artigo foi utilizada a simulação estacionária e transiente de fluxo de água
691 subterrânea em aquífero intergranular submetido à exploração por poços, e de forma
692 complementar a interpretação de assinaturas isotópicas de ^{18}O , ^2H e ^3H , com o
693 objetivo de analisar a dinâmica de flutuações do NA e avaliar as variações temporais
694 dos componentes do BH em uma porção do Sistema Aquífero Urucuia (SAU).

695 O modelo conceitual adotado demonstra-se bem ajustado à simulação de fluxo,
696 permitindo avaliar de forma espacial e temporal as variações mensais dos
697 componentes do BH e sua relação com as variações de NA, evidenciando a
698 influência dos mecanismos de recarga e da exploração do aquífero.

699

700 **2. ÁREA DE ESTUDO**

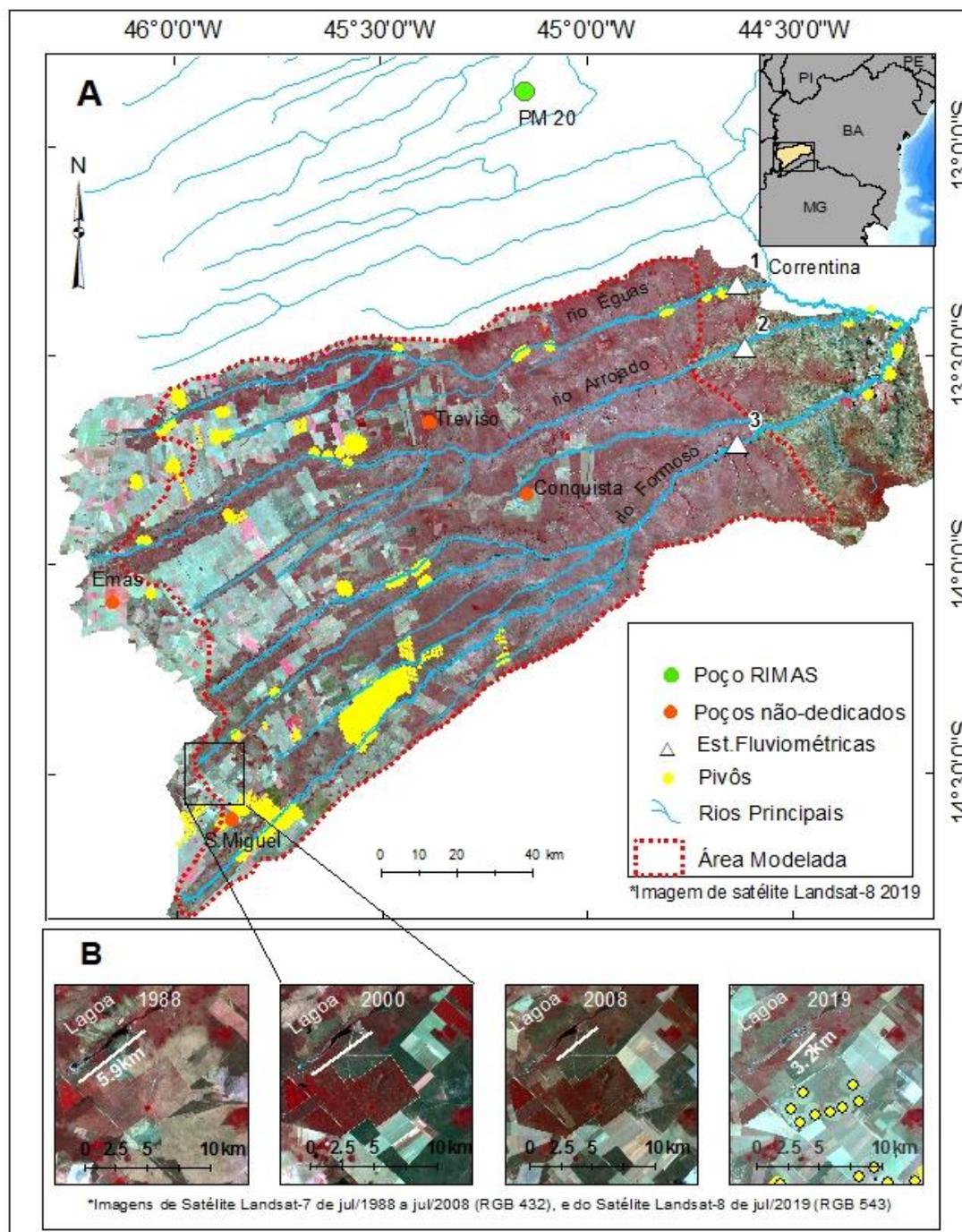
701 **2.1. Hidrografia e Ocupação**

702 A área de estudo compreende as bacias hidrográficas dos rios Arrojado,
703 Formoso e Éguas, afluentes do rio Correntina no Oeste da Bahia, em uma área de
704 aproximadamente 20.000km². A área modelada numericamente inclui a maior parte
705 da área estudada, limitando-se a oeste pelo divisor de águas subterrâneas e a leste
706 pelo contato Urucuia/cristalino (Figura 1A). Trata-se de um Chapadão de topo plano,
707 com elevações variando entre 470 e 1016m, onde drenagens de padrão paralelo a
708 sub-paralelo se instalam não apresentando grandes desníveis.

709 A região, tipicamente agrícola, apresenta uma vegetação nativa do tipo Cerrado
710 e áreas de lavoura, muitas vezes irrigadas por pivôs nas porções planas do
711 Chapadão. Nas porções ribeirinhas dos vales encaixados dos rios principais e
712 afluentes predominam matas de galeria e veredas, além de áreas antropizadas com
713 o pasto e pequenos povoados ribeirinhos. As imagens temporais de satélite mostram
714 uma supressão de aproximadamente 55% da vegetação natural nos últimos 31 anos
715 (tomando como base imagens de satélite entre 1988 e 2019; Figuras 1A e 1B).

716 Até 1955 a região tinha pouca expressividade econômica prevalecendo a
717 criação bovina e plantação de arroz nas regiões ribeirinhas. Na década de 80, inicia-
718 se a ocupação das áreas do chapadão em grandes propriedades. A partir da década
719 de 90, a região transforma-se em um grande eixo produtor do estado com agricultura
720 mecanizada e lavoura irrigada por pivôs (Figura 1A). Atualmente a atividade agrícola
721 cresce continuamente.

722



723

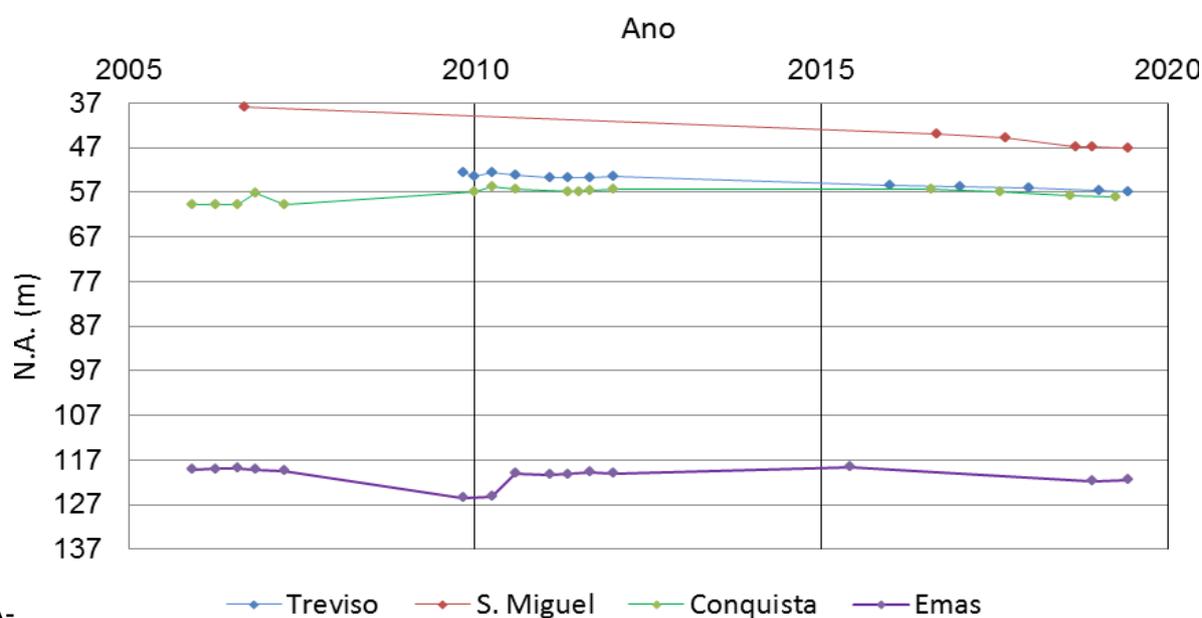
724 Figura 1- (A) Mapa de localização da área estudada e área modelada, estações
 725 fluviométricas e pivôs. (B) Imagens de Satélite de jul/1988 a jul/2019, realçando a lâmina
 726 d'água e áreas úmidas da Lagoa do Pratudão e entorno (linha branca evidencia regressão
 727 da lâmina d'água).

728 O avanço econômico tem sido proporcional ao aumento da demanda de água.

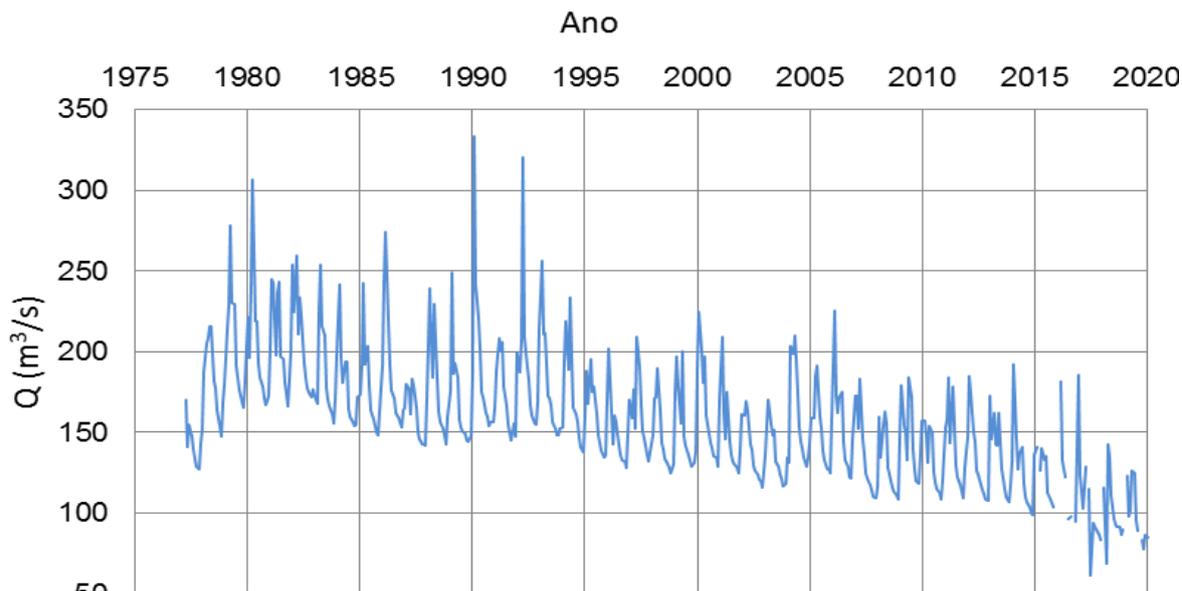
729 Dados de outorgas subterrâneas (aquífero Urucuia) e superficiais (principalmente

730 nas sub-bacias Arrojado e Formoso) indicam demandas por poço variando de 4 a

731 500m³/h, em regime de até 18h/dia, totalizando 1,74m³/s outorgados e em análise
 732 em 2018, tendo por finalidade principalmente a irrigação e abastecimento
 733 humano/animal. Entre os 406 poços cadastrados na área (dos quais 336 encontram-
 734 se na área modelada) apenas 14% destinam-se à irrigação, mas representam 89,3%
 735 do volume total demandado. A somatória das taxas de bombeio de poços na área
 736 em 2017 foi de 4,61m³/s (OLIVEIRA et al., 2019). Entre 2005 e 2017, alguns poços
 737 de produção foram acompanhados com registros não sistemáticos e não contínuos
 738 de NA, utilizando-se medidores de nível manual, onde se observa uma tendência de
 739 declínios contínuos aproximadamente, a partir de 2012 (Figura 2A) e oscilações
 740 entre períodos de rebaixamento e recuperação nos poços Treviso e Conquista. As
 741 vazões médias dos rios também vêm sofrendo declínio (Figura 2B), sendo um
 742 reflexo das ações conjuntas de diminuição de fluxo de base (OLIVEIRA et al., 2019)
 743 e retiradas diretas de águas para irrigação. Alterações significativas nas nascentes,
 744 a exemplo da Lagoa do Pratudão, podem ser vistas na análise temporal de imagens
 745 de satélite da região onde estima-se um recuo de 2,7km entre 1988 e 2019, apesar
 746 de não ocorrer retiradas diretas de água na lagoa (Figura 1B).



747 A-



748 B- 50
 749 Figura 2- (A) Rebaixamentos de NA em poços não-dedicados entre 2005-2019; (B) Médias mensais (Q) da somatória de vazões dos rios Éguas(1), Arrojado(2) e Formoso(3), fonte:
 750 ANA (2020). Ver Figura 1A.
 751

752 2.2. Hidrogeologia

753 O aquífero Urucuia estende-se do norte de MG ao sul do PI, na bacia
 754 Sanfranciscana sendo que a área aflorante apresenta-se de forma contínua na
 755 porção centro norte e acompanha toda a extensão da bacia. Tem sido utilizado o
 756 termo SAU para descrever o aquífero regional Urucuia composto por quatro subtipos
 757 de aquíferos (livre regional, livre profundo, suspenso ou confinado/semi-confinado)
 758 (GASPAR, 2006). O Grupo Urucuia engloba as unidades litoestratigráficas das
 759 formações Posse e Serra das Araras, constituídas por arenitos muito finos, finos e
 760 médios por vezes ocorrendo níveis conglomeráticos e lentes descontínuas
 761 silicificadas. Nos poços de monitoramento (PMs) do Serviço Geológico do Brasil
 762 (SGB), na área de estudo, os perfis litológicos são essencialmente arenosos de
 763 granulometria fina a média com níveis de até 20cm de espessura de arenito
 764 silicificado, não apresentando níveis argilosos ou cascalhosos identificáveis nas
 765 amostras de calha. Os níveis silicificados descontínuos e não mapeáveis na escala

766 de trabalho podem conferir localmente características de aquífero suspenso ou
767 semi-confinamento.

768 A espessura do Grupo Urucuia na área varia entre 35 e 535m e foi levantada a
769 partir de modelagem geológica (OLIVEIRA et al., 2019). Valores de porosidade
770 efetiva (S_y) de 14% e 17%, transmissividade (T) de $4,1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ e $1,6 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$,
771 coeficiente de armazenamento (S) de $8,6 \times 10^{-3}$ e $4,7 \times 10^{-3}$, condutividade hidráulica
772 horizontal (K) de $1,7 \times 10^{-4} \text{m/s}$ e $6,9 \times 10^{-5} \text{m/s}$, e condutividade hidráulica vertical de
773 $1,4 \times 10^{-4} \text{m/s}$ e $8,1 \times 10^{-5} \text{m/s}$ foram obtidos em dois testes de aquífero realizados na
774 área (CPRM, 2008). Transmissividades calculadas em 15 poços a partir do método
775 de recuperação de Jacob mostram também valores da ordem de $10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$. Os níveis
776 estáticos (NEs) são em geral profundos (>30m), exceto nas áreas próximas às
777 drenagens. Existe uma assimetria em relação ao eixo divisor de águas subterrâneas
778 que ocorre no sentido N-S (CPRM, 2008), sendo que os NEs a oeste podem chegar
779 a 177m de profundidade, de acordo com dados próprios levantados em campo.

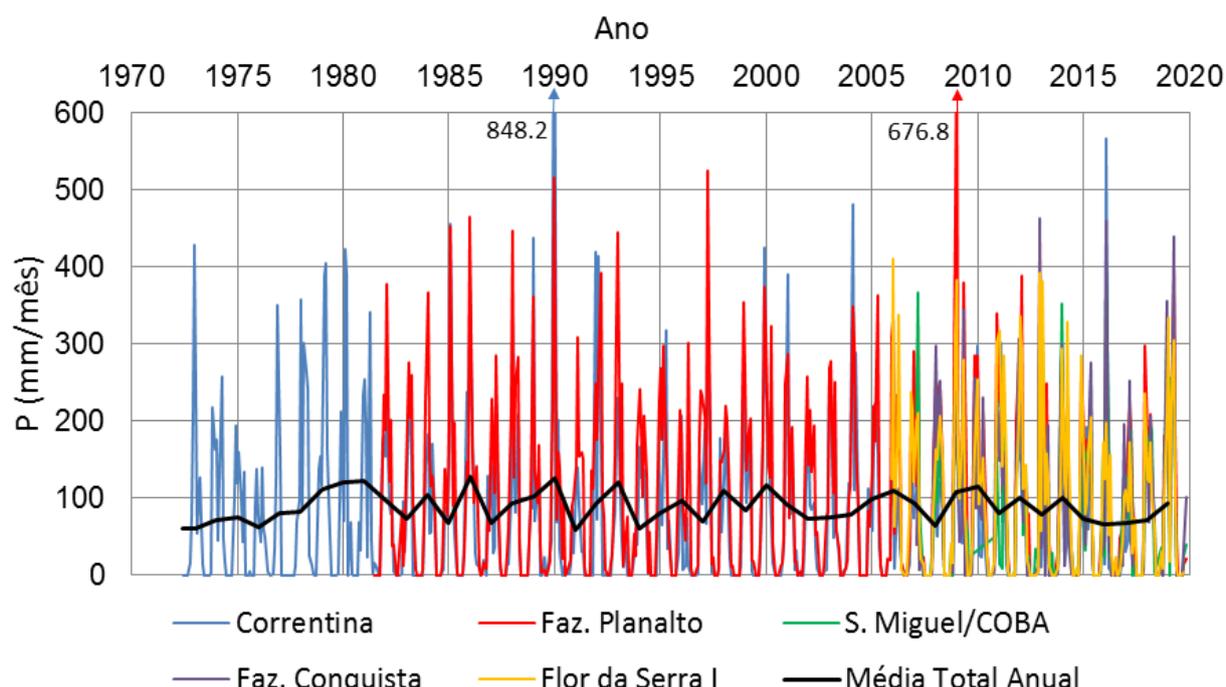
780 **2.3. Clima**

781 O clima é classificado como tropical, de inverno seco, com pluviosidade que
782 diminui de oeste para leste e no sentido norte-sul com valores variando entre 1200 e
783 600mm/ano. Períodos chuvosos são bem definidos: valores máximos mensais
784 ocorrem no período de novembro a maio, e os mínimos de junho a outubro. A
785 temperatura do ar varia de 3° a 38°C, com média de 22°C e umidade relativa
786 variando de 10% a 94%, com média de 58%.

787 Estudo hidroclimático identificou uma diminuição de 12% das chuvas na bacia
788 do rio Corrente a partir de 1980 (Pousa et al., 2019). A tendência de declínio das
789 chuvas na região do aquífero Urucuia é observada em séries históricas mais curtas,

790 sendo que nas séries mais longas observam-se déficits anuais semelhantes aos
791 atuais, ocorridos nas décadas de 1940 e 1950, (CPRM, 2019),

792 Na área de estudo, a série histórica claramente evidencia a variabilidade intra e
793 interanual das chuvas e o período mais seco e com menor variabilidade interanual a
794 partir de 2012/2013 a 2018, semelhante ao ocorrido na década de 1970, e com
795 tendência de aumento das chuvas a partir de 2019/2020 (Figura 3).



796
797 Figura 3- Gráfico de chuvas mensais (P) e média de chuvas total anuais entre 1973-2019
798 (ver estações na Figura 6).

799

800 3. MATERIAIS E MÉTODOS

801 3.1. Obtenção dos Dados de Poços

802 Foram utilizados perfis litológicos/construtivos de 406 poços tubulares, além de
803 informações de campo obtidas pelos autores *in loco* ou disponíveis no banco de
804 dados do SGB (SGB-CPRM, 2020). Os consumos diários de água dos poços foram
805 obtidos através dos dados de outorga, informações *in loco* nas fazendas ou foram
806 estimados em função do uso e ocupação do solo, por semelhanças com outros
807 pontos conhecidos e identificados. Deve-se observar que a estimativa do consumo

808 total diário em uma área de grandes dimensões como a área de estudo, só foi
809 possível em função da relativa homogeneidade das atividades sociais e econômicas
810 e da realização de cadastro *in loco* entre 2015 e 2017 abrangendo grande parte das
811 propriedades. Entretanto, destaca-se que as captações geralmente não apresentam
812 hidrômetros instalados.

813 Os poços monitorados fazem parte da Rede Integrada de Monitoramento de
814 Águas Subterrâneas (RIMAS/SGB) e apresentam características construtivas
815 semelhantes (diâmetro de 4^{1/2}" , 4 a 16 m de filtros e profundidade total de 40m
816 abaixo do nível estático). Nas bacias hidrográficas estudadas, existem onze PMs
817 com dataloggers instalados entre dezembro/2015 e julho/2016, tendo sido utilizados
818 oito deles para calibração do modelo por estarem inseridos na área modelada.

819 **3.2. Coleta e Análise Isotópica de Águas**

820 Estudos de interpretação da assinatura isotópica são feitos visando auxiliar na
821 construção do modelo conceitual e entender a dinâmica da recarga das águas
822 subterrâneas. Foram realizadas análises de isótopos ambientais de Oxigênio (¹⁸O) e
823 Deutério (²H), em 2005/2006 (CPRM, 2008) e em 2016 da seguinte forma: i)
824 amostras de águas de rios em 26 pontos por duas amostragens em 2016 e mais 5
825 pontos em três amostragens em 2005/2006; ii) até 37 poços amostrados em três
826 campanhas em 2005/2006 e 23 poços amostrados em 2015/2016; iii) Uma amostra
827 de lagoa em 2016 e iv) uma amostra de chuva coletada em um evento diário no
828 pluviômetro do tipo convencional, modelo DNAEE, em 2006 e, seis amostras
829 coletadas em duas campanhas em 2016, em coletor adaptado de Gröning et al.
830 (2012) Três amostras de chuva foram descartadas, pois sofreram fracionamento no
831 reservatório. As amostras de água subterrânea estão associadas às formações
832 Serra das Araras e Posse. Além dos isótopos ambientais, o isótopo radiogênico

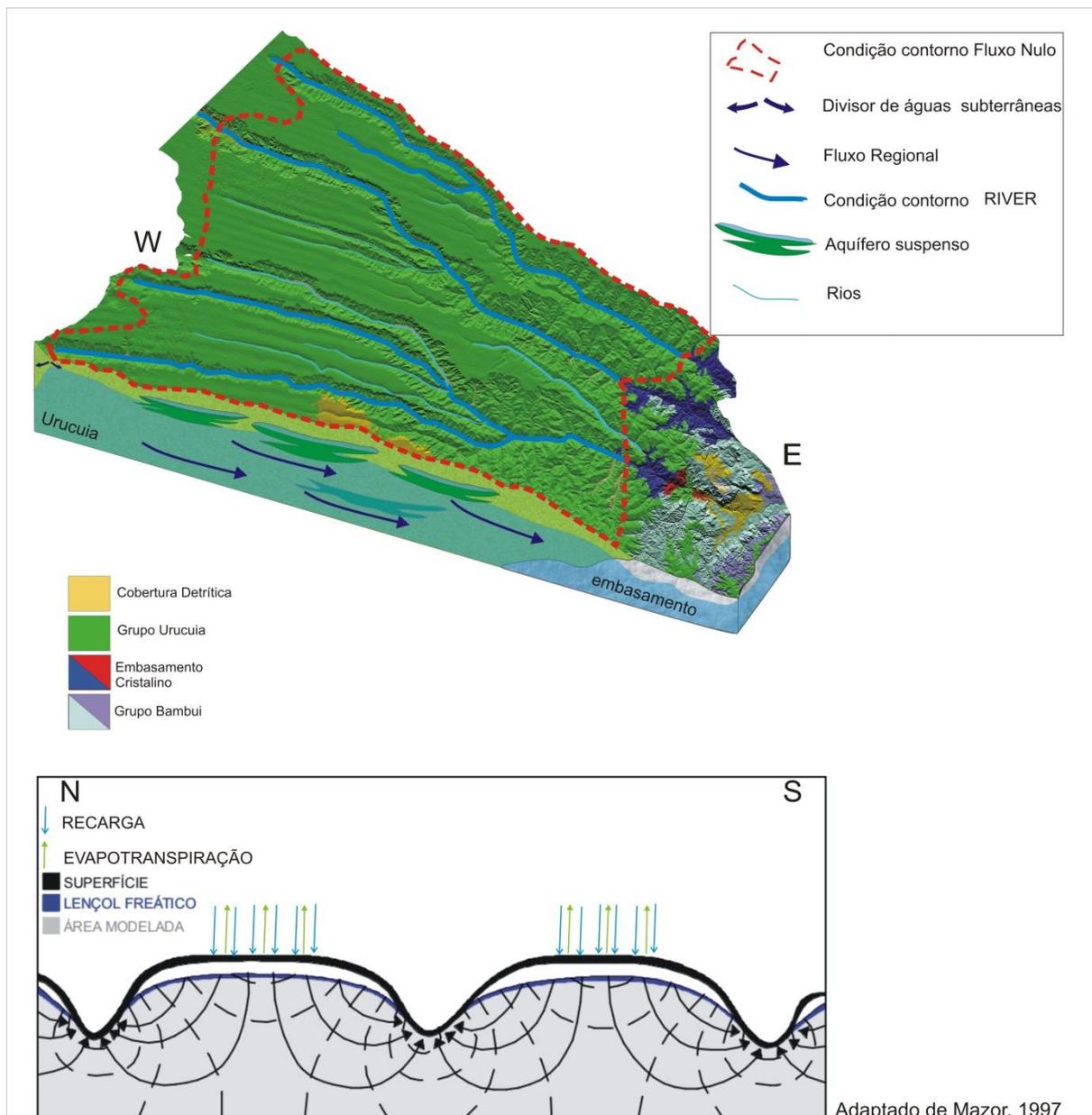
833 Trítio (^3H) foi analisado para águas de rio (3) e poços (5) visando uma interpretação
834 qualitativa da recarga.

835 As análises de isótopos estáveis foram realizadas no Laboratório de Física
836 Nuclear da Universidade Federal da Bahia, utilizando-se espectrômetro de massa
837 com reator automático específico para as análises D/H, e um sistema de preparação
838 automática de amostras on-line específico para análise de $\delta^{18}\text{O}$. As análises de ^3H
839 foram realizadas no Laboratório de Trítio Ambiental do Centro de Desenvolvimento
840 da Tecnologia Nuclear-CDTN, utilizando Enriquecimento Eletrolítico e Contagem em
841 Cintilador Líquido (de acordo com a NBR ISO/IEC 17025:2001).

842 **3.3. Modelo Numérico**

843 Foi adaptado um modelo tridimensional de simulação de fluxo subterrâneo,
844 baseado no método numérico de diferenças finitas, utilizando o software MODFLOW
845 (HARBAUGH et al., 2005) com os pacotes computacionais MODPATH e
846 ZONEBUDGET, na versão comercial VisualModflow4.1.

847 O modelo conceitual considera que o sistema hidrogeológico Urucuia na área
848 modelada é do tipo livre regional, sendo as formações Posse e Serra das Araras
849 uma única unidade hidroestratigráfica, com homogeneidade regional, ou seja, não
850 foram consideradas na escala adotada as porções localizadas de
851 confinamento/semi-confinamento. As águas subterrâneas estão em conexão
852 hidráulica com os rios e não há perdas ou ganhos do fluxo subterrâneo para as
853 unidades litoestratigráficas adjacentes, conforme sugerido pelas assinaturas
854 isotópicas e análise hidrogeológica. Admite-se ainda o divisor de águas
855 subterrâneas localizado a Oeste como fluxo nulo, assim como os divisores de bacia
856 hidrográfica localizados a norte e sul. A saída de água do aquífero ocorre
857 unicamente pelos rios (Figura 4).



858

Adaptado de Mazor, 1997

859 Figura 4. Representação do modelo conceitual. Bloco Diagrama com geologia
 860 simplificada e seção vertical esquematizada.

861 As condições de contorno utilizadas foram dos tipos: i) Impermeável (Newman)
 862 em todo o contorno externo do modelo (i.e. nos divisores de bacias hidrográficas a
 863 Norte e Sul, no divisor de bacia hidrogeológica a oeste, e no contato do Urucuia com
 864 o embasamento cristalino a leste, Figura 1A e 4, ii) Fluxo dependente da carga
 865 hidráulica (Cauchy) representado pela opção “River” nos principais afluentes dos rios

866 Éguas, Arrojado e Formoso. Assim, a condição de contorno “River” simula a
867 influência de corpos d’água superficiais sobre o fluxo de água subterrânea e se
868 admite que o valor da carga no modelo, em cada ponto de um rio, permanece fixo no
869 nível especificado. A área modelada foi discretizada em 177 linhas e 210 colunas,
870 resultando em cerca de 16000 células ativas de 1000 x 1000m.

871 Inicialmente a simulação de fluxo foi feita em estado estacionário objetivando
872 calibrar parâmetros, gerar as cargas hidráulicas iniciais da simulação transiente,
873 efetuar o balanço numérico de massa e ajustar as elevações dos rios à topografia. A
874 calibração do modelo foi feita pelo método da tentativa e erro e posteriormente foi
875 utilizado o pacote PEST de calibração automática (para que os resultados fossem
876 melhor avaliados já que a carga hidráulica não é uma função linear de muitos
877 parâmetros). Os parâmetros calibrados no modelo estacionário foram a
878 condutividade hidráulica (K) e Condutância (C) dos rios. Duas zonas de
879 condutividades hidráulicas diferentes foram definidas a partir de valores obtidos nos
880 testes de aquífero, assim como de tentativas de melhor ajuste de cargas observadas
881 (Figura 6). Devido à ausência de dados de condutividade hidráulica e geometria do
882 leito dos rios, a Condutância foi estabelecida por calibração com valores variando
883 entre 0,0058 m²/s a 1,5 m²/s, baseado em Oliveira et al. (2019). A calibração
884 estacionária utilizou como referencial as cargas hidráulicas dos PMs (cargas
885 observadas) na data da perfuração (2015) comparadas aos valores das cargas
886 calculadas. O parâmetro estatístico de calibração foi o erro médio quadrático
887 normalizado (RMS).

888 Posteriormente foi feita a simulação em estado transiente para obtenção da
889 distribuição das cargas hidráulicas e análise temporal dos componentes do balanço
890 hídrico. Uma análise de sensibilidade em relação às taxas de rebaixamento

891 observadas nos poços foi feita para os parâmetros porosidade efetiva S_y (14-17%) e
892 coeficiente de armazenamento específico S_s (10^{-6} - 10^{-4} 1/m) na simulação transiente.
893 Ressalta-se ainda que o topo do aquífero foi atribuído tomando como base o
894 modelo digital de elevação a partir das imagens SRTM (Shuttle Radar Topography
895 Mission), e a partir dele foram atribuídas as cargas hidráulicas dos poços de
896 monitoramento.

897 A variabilidade espacial e temporal da recarga foi atribuída da seguinte forma: 1)
898 Definição de 3 zonas, tomando como referência as isoietas e a distribuição das
899 estações climatológicas; 2) Cálculo, para cada zona, dos valores médios mensais de
900 chuva (P), evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) pelo método de
901 Thornthwaite (1955), utilizando planilhas elaboradas por Rolim et. al. (1998); 3)
902 Estimativa das recargas mensais em cada zona a partir da diferença entre P e ETR,
903 levando-se em consideração que nos meses onde a ETR foi maior que P a recarga
904 foi considerada nula. Considera-se esta recarga como representativa de parte da
905 água de chuva que infiltrou após evapotranspiração e considerando escoamento
906 superficial não significativo, já que todo o topo plano do chapadão é uma área de
907 recarga e os vales encaixados são considerados áreas de descarga.

908 A simulação transiente foi efetuada no solver WHS, considerando o aquífero
909 livre, para o período de novembro de 2005 a julho de 2019, tendo 1630 “stress
910 periods” de 30 dias (período de tempo em que todas as recargas são consideradas
911 constantes), visando representar as variações sazonais. A escolha do início do
912 período simulado deve-se aos períodos de observação das séries históricas da
913 maioria das estações pluviométricas presentes na área, e o final do período
914 simulado levou em consideração a disponibilização dos dados de NA dos PMs.

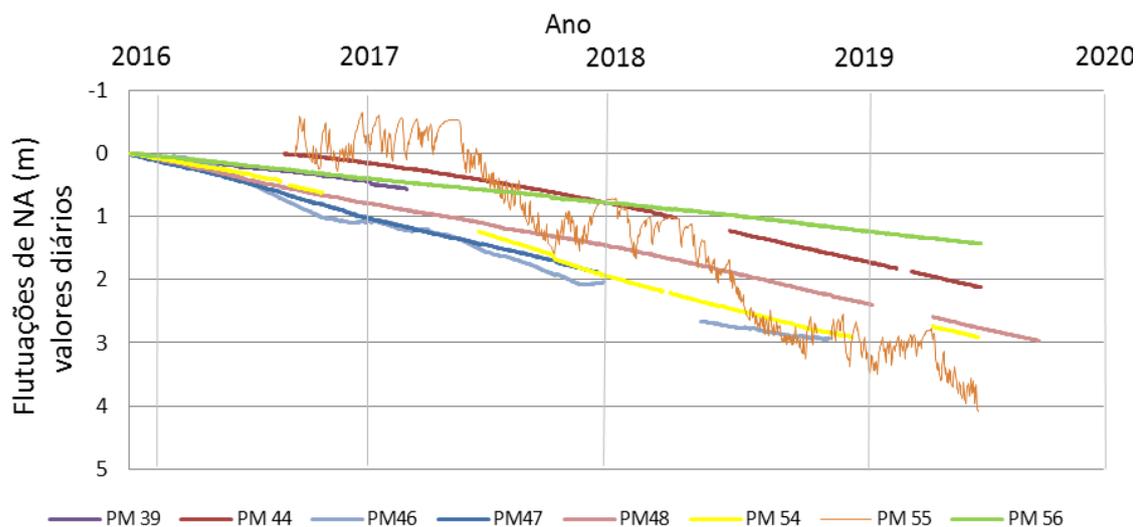
915 Foram feitas três simulações com fluxo transiente: i) considerando a recarga
 916 mensal; ii) considerando a recarga como média móvel dos últimos 12 meses e iii)
 917 considerando a recarga subtraída em 10%.

918

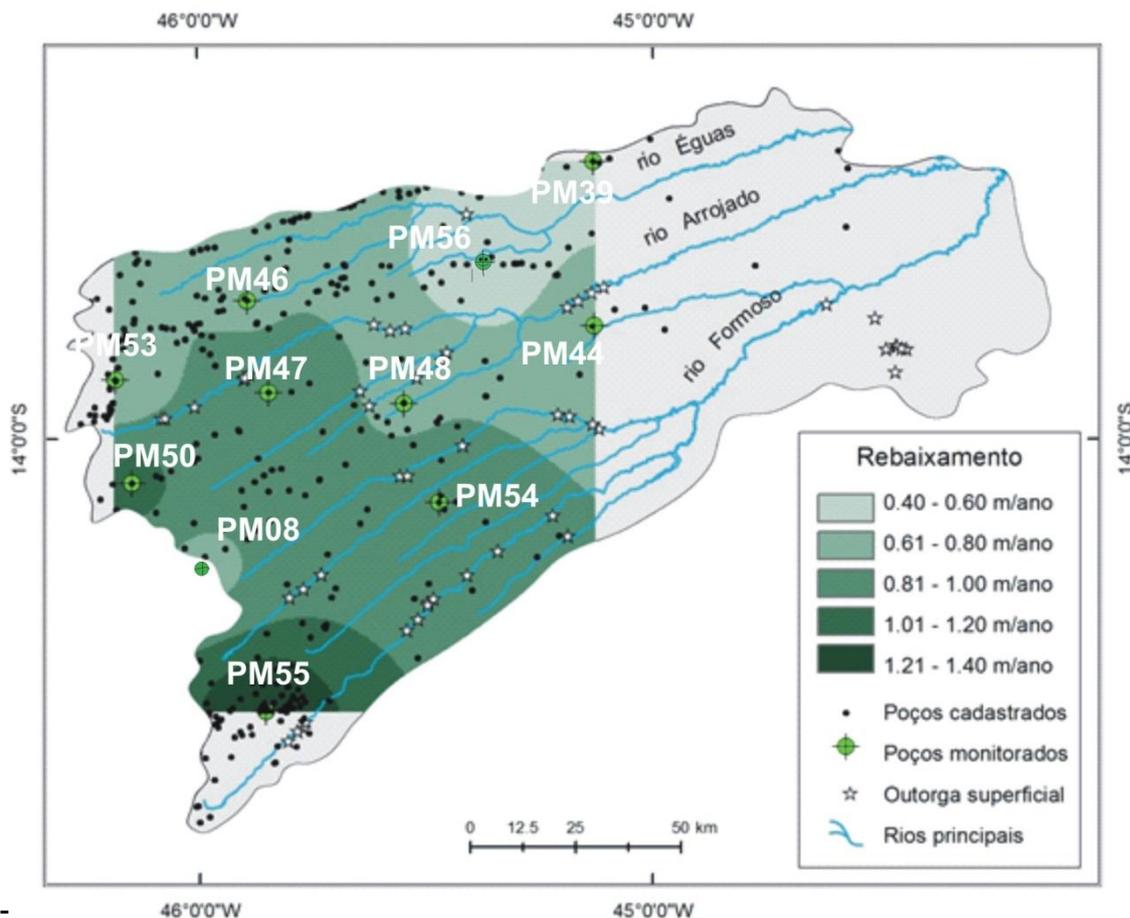
919 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

920 4.1. Rebaixamentos dos NAs

921 O comportamento dos NAs mostra um declínio constante e aproximadamente
 922 uniforme entre os poços (Figura 5A), possivelmente relacionadas à diminuição da
 923 recarga e à exploração por poços. As flutuações de NA nos poços monitorados não
 924 acompanham a sazonalidade das chuvas e atribuímos isso aos NEs profundos
 925 (entre 38 e 120m) e às grandes distâncias dos poços às drenagens (entre 3,5 e
 926 13km). Os PMs também mantêm uma distância mínima de 700m de poços
 927 produtores de alta vazão, com exceção do PM55 (30m) que sofre interferências
 928 geradas pelo bombeamento de poços.



929 A-



930 B-

931 Figura 5- (A) Gráficos de variação dos NAs normalizados nos PMs. (B) Zoneamento dos
 932 rebaixamentos anuais com PMs, poços cadastrados e pontos de outorga superficiais.

933 Os rebaixamentos anuais foram em média de 0,77m/ano (variação de 0,4 a
 934 1,1m/ano). Altas taxas de rebaixamento são verificadas na porção sudoeste da área,
 935 onde concentra-se um grande número de poços de alta vazão e também maior
 936 número de pontos de retirada de águas superficiais (Figura 5B).

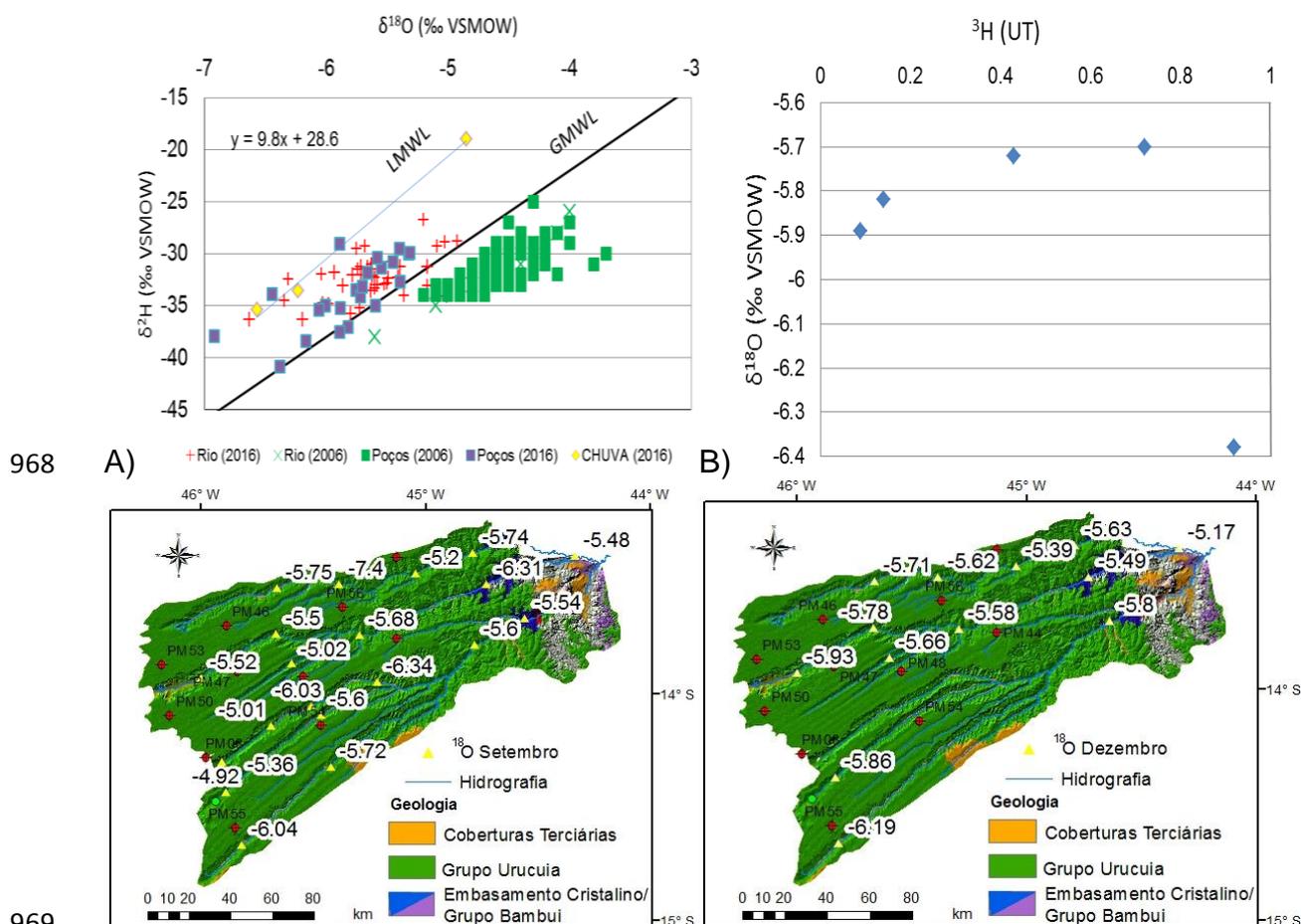
937 4.2. Análises Isotópicas

938 A avaliação dos resultados das análises isotópicas para ^{18}O e ^2H pode ser feita
 939 por meio de diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ contendo a linha de água meteórica global (GMWL)
 940 e a linha meteórica local (LMWL)(GMWL; CRAIG, 1961). A GMWL é uma média de
 941 diversas curvas meteóricas locais e sua posição é controlada por processos como
 942 temperatura, latitude, altitude e trajetória das massas de ar sobre o continente
 943 (CLARK e FRITZ, 1997). As assinaturas isotópicas obtidas para as amostras de

944 chuva local permitiram construir a LMWL, que apresenta um coeficiente angular de
945 9,85, e é considerada preliminar em função do pequeno número de amostras de
946 chuvas. No diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ as águas subterrâneas amostradas posicionaram-se
947 abaixo e paralelamente à LMWL indicando recarga por infiltração direta (ALLISON et
948 al., 1982). Nota-se ainda que as assinaturas isotópicas das águas subterrâneas se
949 aproximam às das águas de chuva mais depletadas em ^{18}O (Figura 6A). Isso leva a
950 possíveis interpretações: i) evidencia o efeito quantidade onde fortes chuvas são
951 correlacionadas a valores mais negativos de ^{18}O (DANSGAARD, 1964), resultando
952 em recargas efetivas apenas em chuvas de grande volume e em concordância com
953 os resultados de cálculo de recarga detalhadas abaixo; ii) condições climáticas
954 distintas que deram origem às recargas, principalmente se considerarmos o
955 posicionamento das amostras em relação à GMWL.

956 Assinaturas isotópicas de águas subterrâneas são também bons indicadores de
957 áreas de recarga e padrões de mistura. Neste estudo, a similaridade das assinaturas
958 entre águas superficiais e subterrâneas, para os dois períodos amostrados (Figura
959 6A) indica ainda a conexão hidráulica entre rios e aquífero. Isso será aplicado no
960 modelo conceitual proposto, onde os rios são zonas de descarga do aquífero (ver
961 item 4.3).

962 Da mesma forma, a similaridade das assinaturas isotópicas entre águas de
963 poços rasos e profundos, captadas das formações Serra das Araras e Posse,
964 respectivamente, ratifica a modelação do aquífero admitindo-se uma única unidade
965 hidroestratigráfica. As águas do aquífero Urucuia são atribuídas como sendo
966 essencialmente de águas de chuva, sem mistura com águas de aquíferos mais
967 profundos.



969

970

971

972

973

974

975

976

977

978

979

980

981

982

983

Figura 6- (A) Diagrama $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ com assinaturas isotópicas de águas de poços, chuva e rio. (B) Diagrama $^3\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ dos poços amostrados. (C) Mapas de distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ de amostras de rio em período chuvoso (dezembro) e em período seco (setembro).

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ das águas dos rios amostradas durante o período de recessão (-5,65‰) é aproximadamente igual à média em épocas chuvosas (-5,7‰), representando, respectivamente, as médias das assinaturas isotópicas de águas subterrâneas (fluxo de base) e a média da mistura águas subterrâneas e chuvas, podendo evidenciar a pequena contribuição do escoamento superficial direto sobre a vazão dos rios. Estes valores são muito próximos da média das águas de poços (-5,88‰), evidenciando infiltração direta da chuva na recarga do aquífero, homogeneização espacial das águas superficiais e subterrâneas e a conexão rio/aquífero. A baixa variabilidade sazonal das amostras de rio também evidencia a dominância da contribuição das águas subterrâneas sobre a contribuição das águas

984 de chuvas no escoamento superficial. A resposta da variabilidade entre o $\delta^{18}\text{O}$ das
985 cabeceiras em relação à jusante no período chuvoso (dezembro) está relacionada à
986 influência da evaporação sobre as águas superficiais ao longo do rio (Figura 6C).

987 O isótopo radioativo Trítio (^3H) possui um período de semidesintegração de
988 12,32anos (LUCAS e UNTERWEGER, 2000) e existe na atmosfera devido a causas
989 naturais e antrópicas. A concentração do Trítio na água é expressa em UT (unidade
990 de Trítio, que equivale a razão $^3\text{H}/\text{H}$), onde em 1UT a razão $^3\text{H}/\text{H}$ equivale a 10^{-18} . O
991 Trítio nas águas subterrâneas variou entre $0,14\pm 0,12$ e $0,92\pm 0,19\text{UT}$, enquanto que
992 nas águas superficiais, entre $0,32\pm 0,14$ e $0,48\pm 0,15\text{UT}$.

993 Verificou-se que os valores de Trítio nas águas superficiais são muito baixos e
994 não correspondem aos valores de Trítio da chuva local, conforme valores de
995 referência apresentados por Mazor (2003) de 5UT e das estações GNP de Salvador
996 e Belo Horizonte, respectivamente de 3,2UT (dado de 1976) e 3,14UT (dado de
997 2010). Sugere-se aqui que representariam o resultado da mistura de várias
998 contribuições de recargas anuais do aquífero, sendo consideradas como anteriores
999 a 1952 ($<0,5\text{UT}$), de acordo com a classificação semiquantitativa proposta por Mazor
1000 (2003).

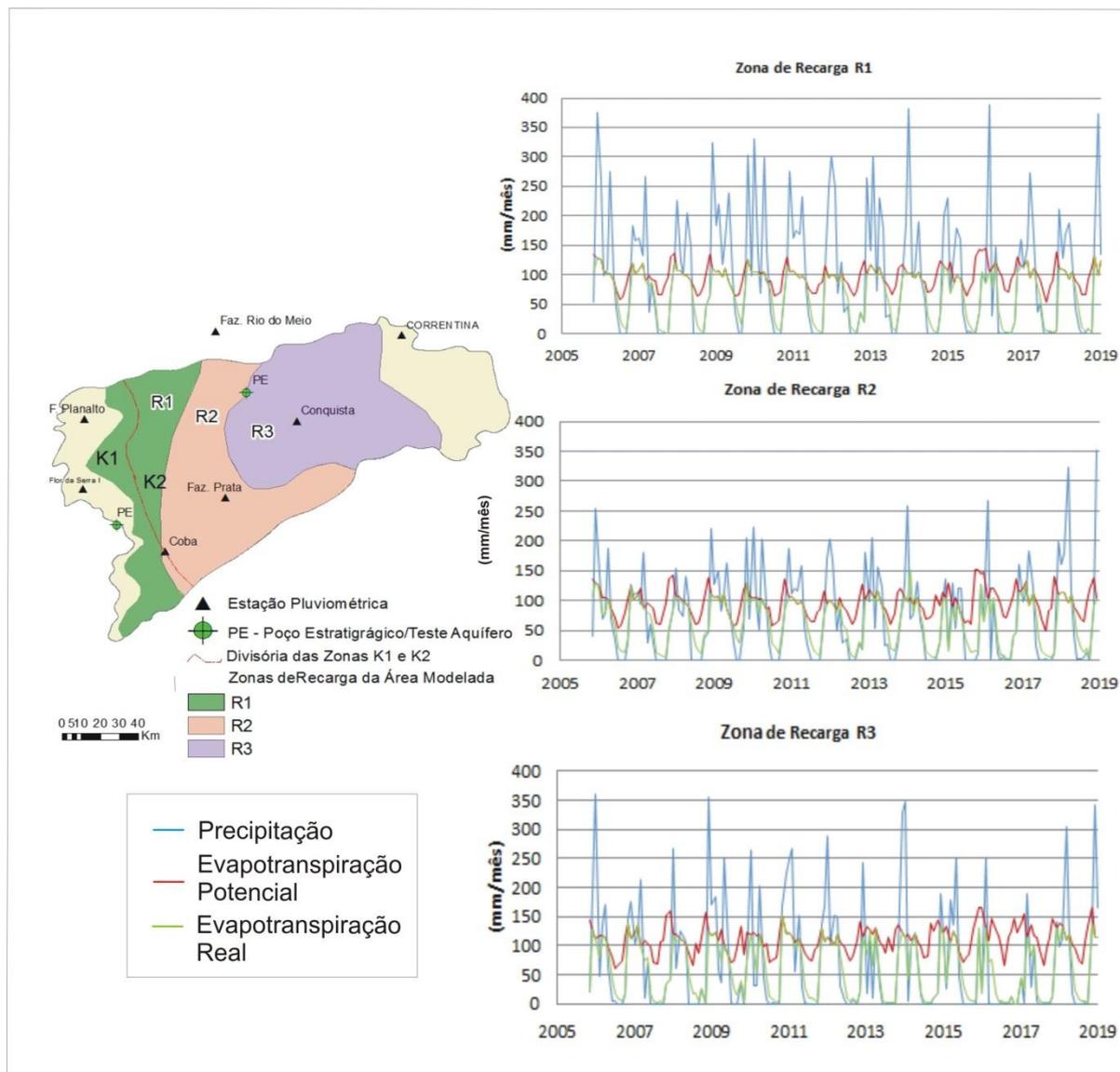
1001 Da mesma forma, as águas subterrâneas com Trítio menor que 0,5UT são
1002 igualmente consideradas como de recarga anterior a 1952, e os dois poços com
1003 valores um pouco mais elevados podem representar águas com maior tempo de
1004 residência, não tendo sido constatado relação com a profundidade dos filtros(Figura
1005 6B). A determinação de um número maior de amostras de águas de poços tubulares
1006 seria fundamental para dirimir dúvidas e acrescentar informações de maior detalhe
1007 como possíveis zonas de semi-confinamento/confinamento, ou a localização de
1008 aquíferos suspensos.

1009 Recomenda-se um número maior de análises de ^3H e $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ em poços e
1010 operação de uma estação permanente de análises isotópicas de chuva ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$ e
1011 ^3H), no Oeste da Bahia, para melhor definir a LMWL e servir de referência em
1012 trabalhos futuros. Além disso, recomenda-se incluir metodologia de investigação
1013 para estimativa quantitativa do tempo de residência da água entre a recarga e a
1014 descarga a exemplo das relações $^3\text{H}/^3\text{He}$ e $^{14}\text{C}/\text{PMC}$.

1015 **4.3. Simulação de Fluxo**

1016 O uso do modelo numérico neste estudo tem o caráter interpretativo, pois
1017 objetiva compreender e descrever a dinâmica de circulação da água no sistema
1018 aquífero e avaliar os componentes do BH do ponto de vista temporal e espacial.

1019 Os gráficos da Figura 7 mostram a distribuição dos valores de P, ETR e ETP
1020 representativos das três zonas de recarga admitidas na simulação da área
1021 modelada. Dessa forma, os meses de efetiva recarga abrangeriam os períodos
1022 chuvosos que excedem a evapotranspiração real, que para o período analisado
1023 predominou entre outubro/novembro e fevereiro/março. O fato de considerar a
1024 recarga efetiva apenas nos períodos de chuva de grande volume é coerente com as
1025 conclusões da análise isotópica.



1026

1027

1028 Figura 7- Mapa esquemático com zonas de recarga e gráficos de precipitação (P),
 1029 evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) nas estações Rio do Meio (R1), Prata (R2) e
 1030 Correntina (R3).

1031 O parâmetro estatístico de calibração (RMS) em relação a cargas hidráulicas

1032 observadas foi de 4,59% no estacionário e 6,27% no transiente. Foi utilizada ainda a

1033 comparação do fluxo de base com as vazões dos rios, além da disposição das

1034 curvas equipotenciais, tomando como base observações de campo (OLIVEIRA et

1035 al., 2019). Os parâmetros calibrados do modelo estacionário foram: condutividades

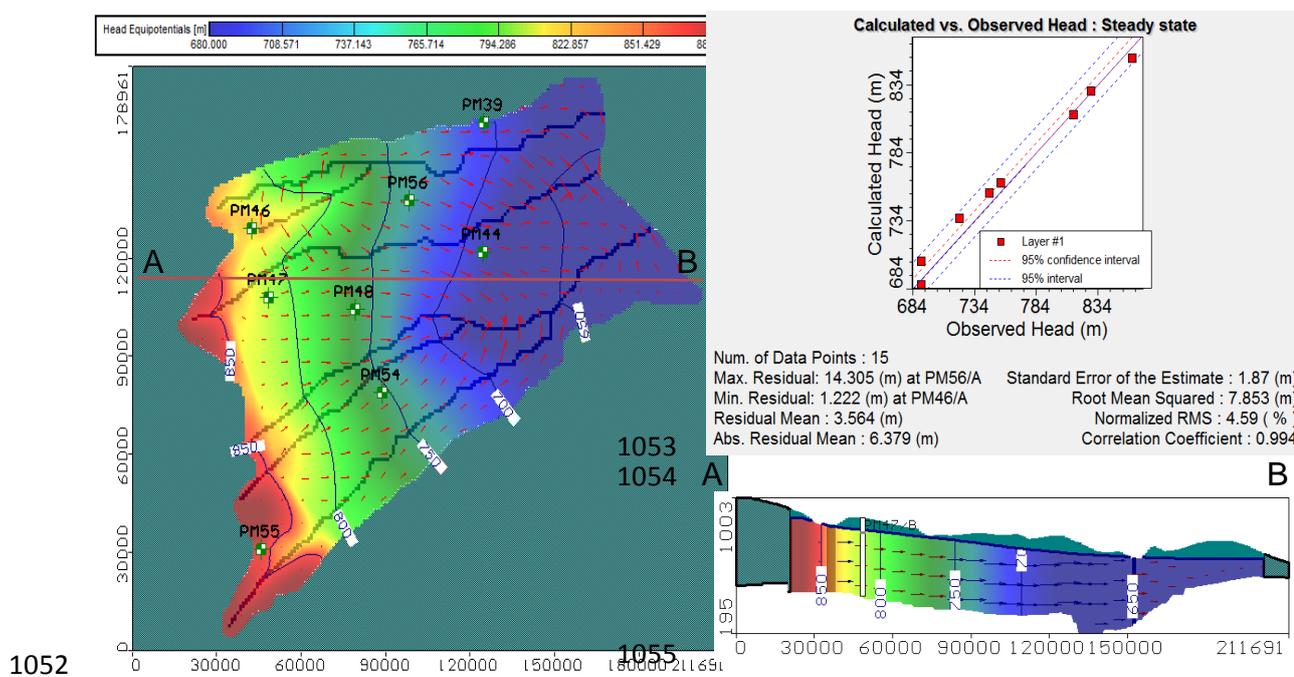
1036 $K1= 1 \times 10^{-4} \text{m/s}$, $K2= 3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ e condutância $C = 90000 \text{m}^2/\text{d}$ (com a exceção de

1037 $24000 \text{m}^2/\text{d}$ em apenas um afluente pequeno com influência em PM 46). No modelo

1038 transiente, os valores admitidos armazenamento específico e porosidade efetiva
 1039 foram $S_s = 2,6 \times 10^{-5} / m$ e $S_y = 0,14$. Estes valores são próximos aos obtidos por
 1040 CPRM (2008).

1041 Na análise de sensibilidade verifica-se que o parâmetro mais sensível à
 1042 calibração foi a condutividade hidráulica, com forte influência da recarga. Considera-
 1043 se o erro residual como bastante razoável dado às limitações e simplificações
 1044 intrínsecas à modelação matemática na área modelada: aproximações do modelo
 1045 digital do terreno; simplificação do modelo conceitual e homogeneidade da geologia
 1046 admitindo-se o caráter regional da pesquisa; generalizações do modelo em função
 1047 da baixa densidade de dados hidrogeológicos; imprecisões na determinação da
 1048 carga dos rios principalmente em função da dimensão das células na modelagem e
 1049 a falta de dados de condutividade hidráulica vertical do leito dos rios.

1050 As distribuições das linhas equipotenciais (Figura 8) para simulação estacionária
 1051 e transiente são visualmente indistinguíveis.



1052
 1053
 1054
 1055
 1056
 1057
 1058
 1059
 1060
 1061
 1062
 1063
 1064
 1065
 1066
 1067
 1068
 1069
 1070
 1071
 1072
 1073
 1074
 1075
 1076
 1077
 1078
 1079
 1080
 1081
 1082
 1083
 1084
 1085
 1086
 1087
 1088
 1089
 1090
 1091
 1092
 1093
 1094
 1095
 1096
 1097
 1098
 1099
 1100
 1101
 1102
 1103
 1104
 1105
 1106
 1107
 1108
 1109
 1110
 1111
 1112
 1113
 1114
 1115
 1116
 1117
 1118
 1119
 1120
 1121
 1122
 1123
 1124
 1125
 1126
 1127
 1128
 1129
 1130
 1131
 1132
 1133
 1134
 1135
 1136
 1137
 1138
 1139
 1140
 1141
 1142
 1143
 1144
 1145
 1146
 1147
 1148
 1149
 1150
 1151
 1152
 1153
 1154
 1155
 1156
 1157
 1158
 1159
 1160
 1161
 1162
 1163
 1164
 1165
 1166
 1167
 1168
 1169
 1170
 1171
 1172
 1173
 1174
 1175
 1176
 1177
 1178
 1179
 1180
 1181
 1182
 1183
 1184
 1185
 1186
 1187
 1188
 1189
 1190
 1191
 1192
 1193
 1194
 1195
 1196
 1197
 1198
 1199
 1200
 1201
 1202
 1203
 1204
 1205
 1206
 1207
 1208
 1209
 1210
 1211
 1212
 1213
 1214
 1215
 1216
 1217
 1218
 1219
 1220
 1221
 1222
 1223
 1224
 1225
 1226
 1227
 1228
 1229
 1230
 1231
 1232
 1233
 1234
 1235
 1236
 1237
 1238
 1239
 1240
 1241
 1242
 1243
 1244
 1245
 1246
 1247
 1248
 1249
 1250
 1251
 1252
 1253
 1254
 1255
 1256
 1257
 1258
 1259
 1260
 1261
 1262
 1263
 1264
 1265
 1266
 1267
 1268
 1269
 1270
 1271
 1272
 1273
 1274
 1275
 1276
 1277
 1278
 1279
 1280
 1281
 1282
 1283
 1284
 1285
 1286
 1287
 1288
 1289
 1290
 1291
 1292
 1293
 1294
 1295
 1296
 1297
 1298
 1299
 1300
 1301
 1302
 1303
 1304
 1305
 1306
 1307
 1308
 1309
 1310
 1311
 1312
 1313
 1314
 1315
 1316
 1317
 1318
 1319
 1320
 1321
 1322
 1323
 1324
 1325
 1326
 1327
 1328
 1329
 1330
 1331
 1332
 1333
 1334
 1335
 1336
 1337
 1338
 1339
 1340
 1341
 1342
 1343
 1344
 1345
 1346
 1347
 1348
 1349
 1350
 1351
 1352
 1353
 1354
 1355
 1356
 1357
 1358
 1359
 1360
 1361
 1362
 1363
 1364
 1365
 1366
 1367
 1368
 1369
 1370
 1371
 1372
 1373
 1374
 1375
 1376
 1377
 1378
 1379
 1380
 1381
 1382
 1383
 1384
 1385
 1386
 1387
 1388
 1389
 1390
 1391
 1392
 1393
 1394
 1395
 1396
 1397
 1398
 1399
 1400
 1401
 1402
 1403
 1404
 1405
 1406
 1407
 1408
 1409
 1410
 1411
 1412
 1413
 1414
 1415
 1416
 1417
 1418
 1419
 1420
 1421
 1422
 1423
 1424
 1425
 1426
 1427
 1428
 1429
 1430
 1431
 1432
 1433
 1434
 1435
 1436
 1437
 1438
 1439
 1440
 1441
 1442
 1443
 1444
 1445
 1446
 1447
 1448
 1449
 1450
 1451
 1452
 1453
 1454
 1455
 1456
 1457
 1458
 1459
 1460
 1461
 1462
 1463
 1464
 1465
 1466
 1467
 1468
 1469
 1470
 1471
 1472
 1473
 1474
 1475
 1476
 1477
 1478
 1479
 1480
 1481
 1482
 1483
 1484
 1485
 1486
 1487
 1488
 1489
 1490
 1491
 1492
 1493
 1494
 1495
 1496
 1497
 1498
 1499
 1500
 1501
 1502
 1503
 1504
 1505
 1506
 1507
 1508
 1509
 1510
 1511
 1512
 1513
 1514
 1515
 1516
 1517
 1518
 1519
 1520
 1521
 1522
 1523
 1524
 1525
 1526
 1527
 1528
 1529
 1530
 1531
 1532
 1533
 1534
 1535
 1536
 1537
 1538
 1539
 1540
 1541
 1542
 1543
 1544
 1545
 1546
 1547
 1548
 1549
 1550
 1551
 1552
 1553
 1554
 1555
 1556
 1557
 1558
 1559
 1560
 1561
 1562
 1563
 1564
 1565
 1566
 1567
 1568
 1569
 1570
 1571
 1572
 1573
 1574
 1575
 1576
 1577
 1578
 1579
 1580
 1581
 1582
 1583
 1584
 1585
 1586
 1587
 1588
 1589
 1590
 1591
 1592
 1593
 1594
 1595
 1596
 1597
 1598
 1599
 1600
 1601
 1602
 1603
 1604
 1605
 1606
 1607
 1608
 1609
 1610
 1611
 1612
 1613
 1614
 1615
 1616
 1617
 1618
 1619
 1620
 1621
 1622
 1623
 1624
 1625
 1626
 1627
 1628
 1629
 1630
 1631
 1632
 1633
 1634
 1635
 1636
 1637
 1638
 1639
 1640
 1641
 1642
 1643
 1644
 1645
 1646
 1647
 1648
 1649
 1650
 1651
 1652
 1653
 1654
 1655
 1656
 1657
 1658
 1659
 1660
 1661
 1662
 1663
 1664
 1665
 1666
 1667
 1668
 1669
 1670
 1671
 1672
 1673
 1674
 1675
 1676
 1677
 1678
 1679
 1680
 1681
 1682
 1683
 1684
 1685
 1686
 1687
 1688
 1689
 1690
 1691
 1692
 1693
 1694
 1695
 1696
 1697
 1698
 1699
 1700
 1701
 1702
 1703
 1704
 1705
 1706
 1707
 1708
 1709
 1710
 1711
 1712
 1713
 1714
 1715
 1716
 1717
 1718
 1719
 1720
 1721
 1722
 1723
 1724
 1725
 1726
 1727
 1728
 1729
 1730
 1731
 1732
 1733
 1734
 1735
 1736
 1737
 1738
 1739
 1740
 1741
 1742
 1743
 1744
 1745
 1746
 1747
 1748
 1749
 1750
 1751
 1752
 1753
 1754
 1755
 1756
 1757
 1758
 1759
 1760
 1761
 1762
 1763
 1764
 1765
 1766
 1767
 1768
 1769
 1770
 1771
 1772
 1773
 1774
 1775
 1776
 1777
 1778
 1779
 1780
 1781
 1782
 1783
 1784
 1785
 1786
 1787
 1788
 1789
 1790
 1791
 1792
 1793
 1794
 1795
 1796
 1797
 1798
 1799
 1800
 1801
 1802
 1803
 1804
 1805
 1806
 1807
 1808
 1809
 1810
 1811
 1812
 1813
 1814
 1815
 1816
 1817
 1818
 1819
 1820
 1821
 1822
 1823
 1824
 1825
 1826
 1827
 1828
 1829
 1830
 1831
 1832
 1833
 1834
 1835
 1836
 1837
 1838
 1839
 1840
 1841
 1842
 1843
 1844
 1845
 1846
 1847
 1848
 1849
 1850
 1851
 1852
 1853
 1854
 1855
 1856
 1857
 1858
 1859
 1860
 1861
 1862
 1863
 1864
 1865
 1866
 1867
 1868
 1869
 1870
 1871
 1872
 1873
 1874
 1875
 1876
 1877
 1878
 1879
 1880
 1881
 1882
 1883
 1884
 1885
 1886
 1887
 1888
 1889
 1890
 1891
 1892
 1893
 1894
 1895
 1896
 1897
 1898
 1899
 1900
 1901
 1902
 1903
 1904
 1905
 1906
 1907
 1908
 1909
 1910
 1911
 1912
 1913
 1914
 1915
 1916
 1917
 1918
 1919
 1920
 1921
 1922
 1923
 1924
 1925
 1926
 1927
 1928
 1929
 1930
 1931
 1932
 1933
 1934
 1935
 1936
 1937
 1938
 1939
 1940
 1941
 1942
 1943
 1944
 1945
 1946
 1947
 1948
 1949
 1950
 1951
 1952
 1953
 1954
 1955
 1956
 1957
 1958
 1959
 1960
 1961
 1962
 1963
 1964
 1965
 1966
 1967
 1968
 1969
 1970
 1971
 1972
 1973
 1974
 1975
 1976
 1977
 1978
 1979
 1980
 1981
 1982
 1983
 1984
 1985
 1986
 1987
 1988
 1989
 1990
 1991
 1992
 1993
 1994
 1995
 1996
 1997
 1998
 1999
 2000
 2001
 2002
 2003
 2004
 2005
 2006
 2007
 2008
 2009
 2010
 2011
 2012
 2013
 2014
 2015
 2016
 2017
 2018
 2019
 2020
 2021
 2022
 2023
 2024
 2025
 2026
 2027
 2028
 2029
 2030
 2031
 2032
 2033
 2034
 2035
 2036
 2037
 2038
 2039
 2040
 2041
 2042
 2043
 2044
 2045
 2046
 2047
 2048
 2049
 2050
 2051
 2052
 2053
 2054
 2055
 2056
 2057
 2058
 2059
 2060
 2061
 2062
 2063
 2064
 2065
 2066
 2067
 2068
 2069
 2070
 2071
 2072
 2073
 2074
 2075
 2076
 2077
 2078
 2079
 2080
 2081
 2082
 2083
 2084
 2085
 2086
 2087
 2088
 2089
 2090
 2091
 2092
 2093
 2094
 2095
 2096
 2097
 2098
 2099
 2100
 2101
 2102
 2103
 2104
 2105
 2106
 2107
 2108
 2109
 2110
 2111
 2112
 2113
 2114
 2115
 2116
 2117
 2118
 2119
 2120
 2121
 2122
 2123
 2124
 2125
 2126
 2127
 2128
 2129
 2130
 2131
 2132
 2133
 2134
 2135
 2136
 2137
 2138
 2139
 2140
 2141
 2142
 2143
 2144
 2145
 2146
 2147
 2148
 2149
 2150
 2151
 2152
 2153
 2154
 2155
 2156
 2157
 2158
 2159
 2160
 2161
 2162
 2163
 2164
 2165
 2166
 2167
 2168
 2169
 2170
 2171
 2172
 2173
 2174
 2175
 2176
 2177
 2178
 2179
 2180
 2181
 2182
 2183
 2184
 2185
 2186
 2187
 2188
 2189
 2190
 2191
 2192
 2193
 2194
 2195
 2196
 2197
 2198
 2199
 2200
 2201
 2202
 2203
 2204
 2205
 2206
 2207
 2208
 2209
 2210
 2211
 2212
 2213
 2214
 2215
 2216
 2217
 2218
 2219
 2220
 2221
 2222
 2223
 2224
 2225
 2226
 2227
 2228
 2229
 2230
 2231
 2232
 2233
 2234
 2235
 2236
 2237
 2238
 2239
 2240
 2241
 2242
 2243
 2244
 2245
 2246
 2247
 2248
 2249
 2250
 2251
 2252
 2253
 2254
 2255
 2256
 2257
 2258
 2259
 2260
 2261
 2262
 2263
 2264
 2265
 2266
 2267
 2268
 2269
 2270
 2271
 2272
 2273
 2274
 2275
 2276
 2277
 2278
 2279
 2280
 2281
 2282
 2283
 2284
 2285
 2286
 2287
 2288
 2289
 2290
 2291
 2292
 2293
 2294
 2295
 2296
 2297
 2298
 2299
 2300
 2301
 2302
 2303
 2304
 2305
 2306
 2307
 2308
 2309
 2310
 2311
 2312
 2313
 23

Usando as recargas mensais obtidas da Figura 7, a simulação transiente mostra boa concordância de rebaixamentos (declínios de cargas hidráulicas) simulados e observados em termos de tendência interanual. Contudo, as cargas simuladas apresentam uma variabilidade sazonal que parece ser inexistente nas cargas reais observadas (Figura 9A). Por outro lado, percebe-se um bom ajuste do fluxo de base simulado à somatória das vazões médias dos rios tanto a nível interanual e sazonal (Figura 9C e 9D).

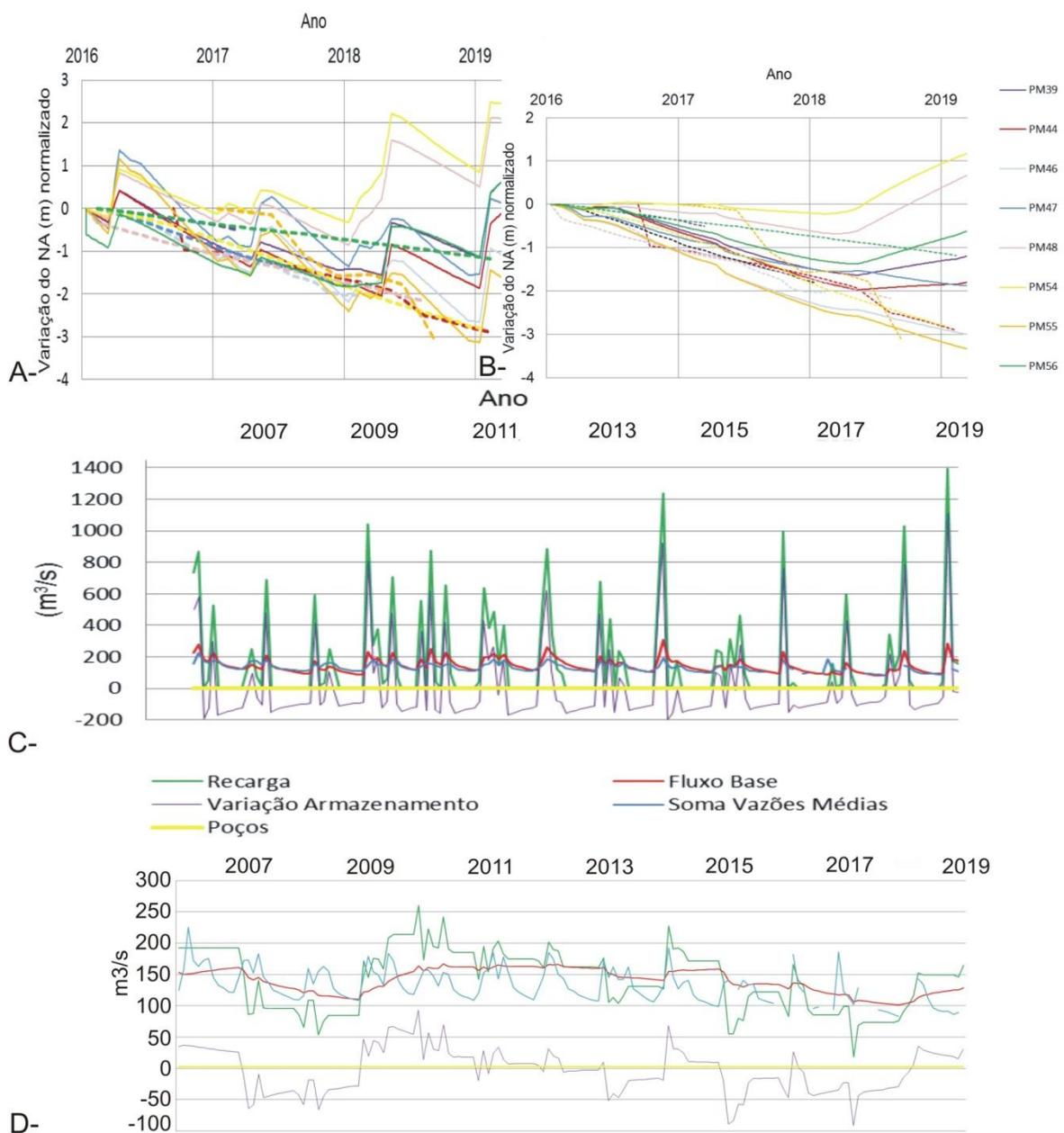


Figura 9- (A) Gráfico de declínio de NA observados (linhas tracejadas) e calculados na simulação transiente com recargas mensais (linhas contínuas). (B) Gráfico de declínio de NA observados (linhas tracejadas) e calculados na simulação transiente com recargas mensais após aplicação da média móvel anual (linhas contínuas); (C) Variação temporal dos componentes do BH comparado à somatória das vazões médias dos rios (Figura 2B). (D) Variação temporal dos componentes do BH mensal (média móvel anual).

Constata-se uma aparente discrepância entre as sazonalidades nas observações de cargas hidráulicas (basicamente ausente) e vazões superficiais (muito regular e pronunciada) consideradas aqui como boas aproximações do fluxo de base real. De caráter hipotético, levantamos a possibilidade de um efeito significativo da espessura elevada da zona não saturada (ZNS) em grande parte do aquífero. Isso pode levar a uma diferença entre a recarga já calculada na superfície do solo (recarga superficial) e a recarga que chega ao lençol freático na profundidade (recarga freática) (e.g., Dickinson et al., 2014). Essa diferença não se manifestará na quantidade de recarga (ETR já foi considerada e não há mais perdas d'água na ZNS), mas na distribuição temporal da recarga efetivamente contribuindo ao volume de água armazenado no aquífero.

Supõe-se, de forma simplificada, que um impulso de recarga superficial se dispersa ao atravessar a ZNS, fazendo com que parte desse impulso pode alcançar o lençol freático mais rápido, enquanto o restante demore meses ou até um ano. Em termos de modelagem matemática esta situação foi considerada por meio da conversão dos valores de recarga superficial, já calculados, a recargas freáticas usando a média móvel das recargas superficiais dos últimos 12 meses no modelo transiente (Figura 8B). Assim, eliminando-se a sazonalidade há melhor ajuste das cargas hidráulicas calculadas à situação real, no entanto com efeito de comprometimento significativo no ajuste às vazões reais.

A análise temporal da variação dos componentes do BH simulado neste cenário mostra que a recarga nos últimos anos vem sofrendo maior variabilidade anual e

diminuiu significativamente entre 2012 e 2017 (Figura 9D). Isso se reflete na variação de armazenamento predominantemente negativa durante o período (NA em declínio) e na diminuição do fluxo de base dos rios. A partir de 2017, a recarga tem uma tendência a se recuperar. Contudo, se considerarmos que mesmo após o aumento das recargas em 2017 os NAs observados no aquífero se mantêm em declínio, uma provável causa seria um subdimensionamento das descargas por poços no modelo.

Percebe-se que a contrastante espessura da ZNS nas áreas de vale e nas áreas do Chapadão responde pela contrastante sazonalidade de cargas hidráulicas e fluxo de base. Próximo às drenagens, a diferença entre recarga superficial e freática torna-se mínima (como ocorre no PM20, localizado na bacia do rio Grande-aquífero Urucua-Figura 10) e, nas áreas no chapadão, mais distantes dos rios, a sazonalidade na elevação do nível freático é efetivamente removida pela propagação da recarga através da ZNS (Figura 5A).

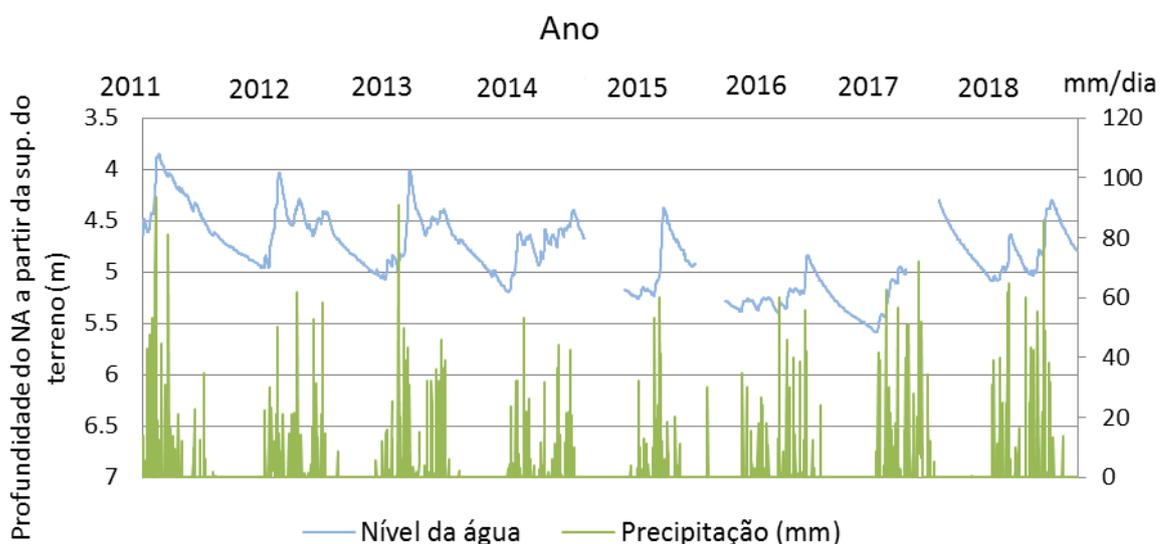


Figura 10- Variação de NA subterrânea (azul) e da precipitação (verde) no PM20 localizado a aproximadamente 85km do PM32, fora da área de estudo, ver Figura 1.

Para investigar ainda a dinâmica do comportamento hidráulico do aquífero, simulamos as respostas degrau a uma diminuição súbita de 10% na recarga, com

iguais condições de contorno e admitindo-se vazão de poços constante. O sistema se reequilibraria a partir de aproximadamente uma década, destacando-se o efeito sobre o componente fluxo de base (Figura 11A), e redução do armazenamento na fase transiente (Figura 11B). Já nas respostas das cargas hidráulicas, observa-se dois tipos gerais de comportamentos (Figura 11C). Os maiores efeitos da redução de recarga sobre os rebaixamentos de NAs em termos de magnitude e tempo para reequilíbrio ocorrem sobre os poços da porção oriental (PMs 46,47,48,55), exceto para o poço 54. Na porção ocidental (PMs 39,44,56) tanto os rebaixamentos finais quanto a duração do período transiente são menores. Isso pode indicar uma maior sensibilidade da zona oriental a mudanças climáticas futuras em termos de disponibilidade de água subterrânea.

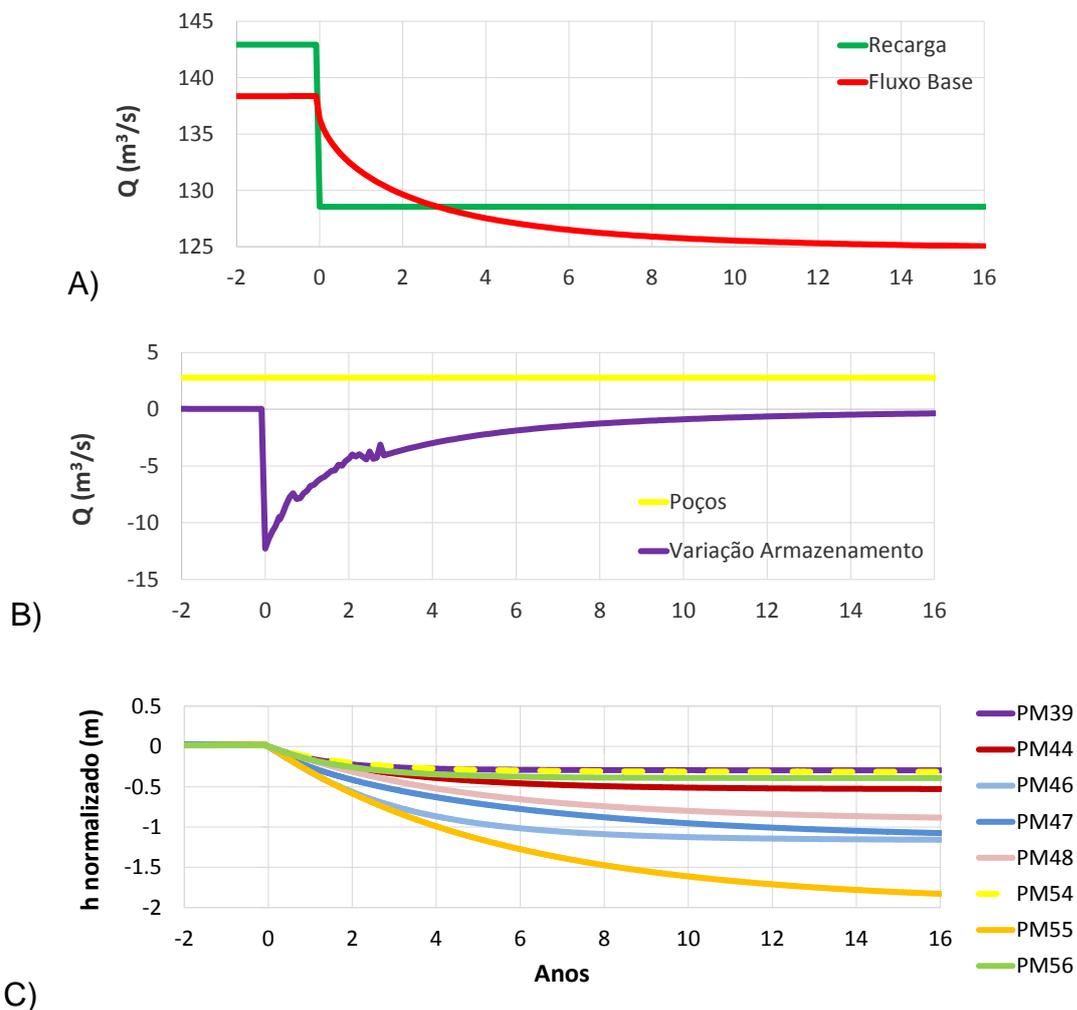


Figura 11- Respostas degrau a uma redução em 10% da recarga com extração dos poços constante. (A) Fluxo de base, (B) Variação de armazenamento e (C) Cargas hidráulicas.

Verifica-se, portanto rebaixamentos de até 1,8 metros para a redução aplicada de 10% na recarga. ANA (2017) simulou em regime permanente um cenário de possível mudança climática considerando redução de 21% na recarga e obteve rebaixamentos superiores a 3m na potenciometria da bacia do rio Corrente, para o período 2021-2050.

5. CONCLUSÃO

A análise temporal dos componentes do BH a partir da simulação transiente permitiu reconhecer a dinâmica da água no sistema hídrico em uma porção do aquífero Urucuia. A interpretação isotópica ratifica o modelo conceitual proposto e contribui no entendimento da composição da recarga. As oscilações de NA subterrânea, com tendência de declínio constante provavelmente iniciou-se em 2012 e são atribuídas ao efeito da variabilidade na recarga nos últimos 7anos e à exploração do aquífero. O melhor ajuste da simulação, utilizando-se da média móvel da recarga freática sugere uma diferenciação temporal entre esta e a recarga efetiva. Dessa forma, a sazonalidade na elevação do nível freático é efetivamente removida pela propagação da recarga nas áreas de maior espessura da ZNS.

A simulação transiente permitiu ainda verificar a dinâmica do comportamento hidráulico do sistema hídrico, onde a diminuição súbita de 10% na recarga, em um cenário futuro hipotético, necessitaria de no mínimo uma década para se reequilibrar.

Recomendamos, além da continuidade das análises isotópicas sistemáticas das águas de chuva, a manutenção da rede de monitoramento hidroclimatológico e hidrogeológica e a instalação de hidrômetros nos poços produtivos de alta vazão

visando aprimorar as ferramentas de modelagem e subsidiar a implantação de mecanismos de gestão mais flexíveis e dinâmicos.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Brasília, 2020. Available at: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Access: 03 Mar. 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). *Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada* - Relatório Final. Consórcio Engecorps - Walm - Brasília. 3 Volumes. 2017.
- ALLISON, G.B. Relationship between ^{18}O and Deuterium in water in sand columns undergoing evaporation. *Journal of Hydrology*, v. 55, n. 1/4, p. 163-169. 1982.
- CHAMINÉ, H.I. Water resources meet sustainability: new trends in environmental hydrogeology and groundwater engineering. *Environmental Earth Science*, v. 73, p. 2513-2520, 2015.
- CLARK, I.D.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York: CRC Press, 1997. 328p.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. *Hidrogeologia do aquífero Urucuia: Bacias dos Rios Arrojado e Formoso, Bahia*. Brasília: CPRM, 2008. 1 CD-ROM. Projeto Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2019. Aquífero Urucuia. Caracterização Hidrológica com Base em Dados Secundários. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20922>
- CRAIG, H.C. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, v. 133, p. 1702-1703, 1961.
- DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v. 16, n. 4, p. 436-468. Janeiro, 1964.
- DICKINSON, J.E; FERRÉ, T.P.A.; BAKKER, M.; CROMPTON, B. 2014. A Screening Tool for Delineating Subregions of Steady Recharge within Groundwater Models. *Vadose Zone Journal*, v. 13, n. 6, p.1-15.
- FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- FISHER, J.C.; BARTOLINO, J.R.; WYLIE, A.H.; SUKOW, J.; MCVAY, M. *MODFLOW-USG: model of groundwater flow in the Wood River Valley aquifer system in Blaine County, Idaho*. Reston, VA, USA:USGS, 2016.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. *Groundwater*. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604p.

GASPAR, M.T.P. Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão. 2006. 158f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, UnB, Brasília, 2006.

GRÖNING, M., LUTZ, H.O., ROLLER-LUTZ, Z., KRÁLIK, M., GOURCY, L., PÖLTENSTEIN, .L.A Simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology* v. 448, p. 195–200. 2012
 GUZMAN, S.; PAZ, J.; TAGERT, M. The Use of NARX Neural Networks to Forecast Daily Groundwater Levels. *Water Resources Management*, v. 31, n. 5, p. 1591-1603, 2017.

HARBAUGH, A.W. MODFLOW–2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. Reston, VA: U.S. USGS, 2005. (USGS Open file Report).

LE BROCCQUE, A.F.; KATH, J.; REARDON-SMITH, K. Chronic groundwater decline: a multi-decadal analysis of groundwater trends under extreme climate cycles. *Journal of Hydrology*, v. 561, p. 976-986, 2018.

LUCAS, L.L.; UNTERWEGER, M.P. Comprehensive review an half-life of Tritium. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 105, p. 54, 2000.

MAIMONE, M. Defining and managing sustainable yield. *Ground Water*. v, 42, n. 6, p. 809–814, 2004.

MAZOR, E. Chemical and isotopic groundwater hydrology. 3.ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 352p.

MOHANTY, S.; JHA, M.K.; KUMAR, A. Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulating groundwater flow in Kathajodi–Surua Inter-basin of Odisha, India. *Journal of Hydrology*. v. 495, p. 38-51, 2013.

OLIVEIRA, L.T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L.R.B., GRISSOLIA. E.M. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia - Brazil. *Revista Ambiente e Água*, v. 14, n. 6, 2019.

OU, G.; MUNOZ-ARRIOLA, F.; UDEN, D.R.; MARTIN, D.; ALLEN, C.R.; SHANK, N. Climate change implications for irrigation and groundwater in the Republican River Basin, USA.(Report). *Climatic Change*, v. 151, n. 2, p. 303 14, 2018.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.; CASTRO, M. Climate change and intensive irrigation growth in western Bahia, Brazil: the urgent need for hydroclimatic monitoring. *Water*, v. 11, n. 5, p. 933, 2019.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: Normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. Brasília: SBG/CPRM, 2020 Disponível em <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: Março/2020.

THEIS, C.V. The source of water derived from wells: essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civil Engineering*, v. 10, p. 277-280, 1940.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The Water Balance. *Publications in Climatology*, Drexel Institute of Technology, v. 8, n. 1. 1955.

WADA, Y. Modeling groundwater depletion at regional and global scales: present state and future prospects. *Survey Geophysics*, v. 37, p. 419–451, 2016.

WERNER, A.D.; ZHANG, Q.; XUE, L.; SMERDON, B.D.; LI, X.; ZHU, X.; YU, L.; LI, L. An Initial Inventory and Indexation of Groundwater Mega-Depletion Cases. *Water Resources Management*, v. 27, n. 2, p. 507-533, 2013.

ZHOU, Y. A Critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*, v. 370, n. 1-4, p. 207-213, 2009.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática numérica na simulação de fluxo hídrico subterrâneo, utilizada nesta pesquisa, possibilitou compreender a dinâmica das águas no sistema hídrico Urucuia através do comportamento transitório das cargas hidráulicas e da evolução dos componentes do balanço hídrico.

A geometria da base do aquífero, determinada pela modelagem geológica, foi importante na concepção dos estudos dirimindo as ambiguidades relatadas na bibliografia sobre a espessura do aquífero. O arcabouço tectônico configura-se como uma bacia tipo sag, com espessuras máximas próximas a 500 m, sendo adelgada nas bordas e com depocentro no centro norte da área. As falhas e/ou níveis silicificados não imprimem regionalmente a formação de diversidade hidroestratigráfica, mas em escalas maiores deve-se atentar para ocorrências de aspectos localizados no arcabouço hidrogeológico a serem considerados, a exemplo de aquíferos suspensos ou semi-confinamento/confinamento de determinadas porções do aquífero proporcionado pelos níveis descontínuos de silicificação.

Em geral, trabalhos de modelagem hidrogeológica em escala regional (sub-bacias) exigem maior complexidade, pois geralmente envolvem mais de um aquífero, com arcabouço hidrogeológico mais complexo. Contudo, nesse caso específico a monotonia geológica corroborou para as simplificações admitidas no estudo, juntamente com a feição geomorfológica predominante de platôs de baixa declividade e rios com declividades suaves e poucas quebras, com alta conexão hidráulica com o aquífero livre. Apesar das simplificações necessárias que foram adotadas na modelação, a simulação mostrou-se eficiente principalmente quando comparados o fluxo de base do modelo às vazões médias reais na bacia. Dessa forma o modelo conceitual proposto para a simulação do fluxo de água

subterrânea mostrou-se satisfatório e ratificado pelos dados das assinaturas isotópicas das águas superficiais, subterrâneas e de chuva.

As características da ocupação territorial da área estudada, onde atividades essencialmente agrícolas foram se instalando a partir do desmatamento da vegetação natural e plantio de culturas e pastagens nas áreas planas dos Chapadões, acompanham também a evolução crescente da exploração das águas subterrâneas a partir de poços tubulares. Nesse sentido a vazão de exploração dimensionada nesta tese é uma fotografia de um dado intervalo de tempo, mas deve-se ressaltar o seu caráter dinâmico e a tendência de permanecer em evolução crescente. Por outro lado, variáveis como mudanças climáticas e uso e ocupação do solo podem alterar significativamente a componente de fluxo de recarga corroborando com o caráter dinâmico transitório no balanço hídrico e conseqüentemente influenciando nos níveis d'água subterrâneos e no fluxo de base dos rios.

O posicionamento das estações fluviométricas, situadas próxima ao contato litológico entre o Grupo Urucuia e as unidades adjacentes do embasamento, favoreceram uma boa representatividade de toda a área de captação das sub-bacias estudadas. Neste sentido, o incremento de novas estações fluviométricas, pluviométricas e climatológicas que foram instaladas na região a partir de 2015 pelo Serviço Geológico do Brasil- CPRM favorece aos futuros estudos que venham a ser realizados em sub-bacias dentro do sistema aquífero Urucuia, possibilitando investigar questões de ordem local.

Os rebaixamentos dos últimos sete anos observados nas cargas hidráulicas do aquífero Urucuia, demonstrados pela série histórica de dados de níveis d'água dos poços de monitoramento e pela simulação, demonstram a diminuição da precipitação, afetando diretamente a recarga do aquífero. Contudo, o posicionamento das zonas de maior rebaixamento dos níveis d'água em áreas mais intensamente exploradas (porção oeste), mostra que além da diminuição das recargas, a componente descarga artificial também exerce

grande influência nos rebaixamentos, não tendo sido possível quantificar o grau de interferência de cada uma delas isoladamente. As flutuações de níveis d'água subterrânea simuladas estão compatíveis com as flutuações de níveis d'água reais, e evidenciam a importância do mecanismo de recarga, onde pequenos volumes de água tardam a compor o aquífero.

O efeito quantidade das assinaturas isotópicas das águas subterrâneas e o bom ajuste do componente simulado do fluxo de base com as vazões superficiais médias dos rios após o uso da média móvel das recargas, corroboraram com a hipótese de que a recarga do aquífero Urucuia nas áreas de platô remove a sazonalidade dos níveis d'água subterrâneos em função da sua trajetória na espessa zona não saturada, em contraste com as áreas de vale onde há sazonalidade dos níveis em função da precipitação. Os rebaixamentos contínuos do aquífero trazem como consequência mais imediata a interferência no fluxo de base dos cursos d'água, provocando possivelmente efeitos mais danosos principalmente nos cursos d'água superiores dos rios (nascentes).

Apesar de ter sido instalada recentemente uma nova estação GNIP, com sede na CPRM/Salvador para acompanhamento dos dados isotópicos de águas de chuva, recomenda-se a instalação também de uma estação GNIP na região Oeste do estado da Bahia, localizada na área dos chapadões, que contribuirá para a elaboração de uma Linha Meteorológica de Água Local.

A análise de causa e efeito sob stress do sistema hídrico, principalmente quando se refere à relação água subterrânea-água superficial, carece de dados de condutância dos leitos de rio, e nesse caso em particular recomenda-se o estudo e determinação da condutividade hidráulica de leito dos rios. O desenvolvimento de estudos em escala de detalhe para obtenção destes parâmetros de entrada no modelo em escala local é recomendável, apesar da metodologia de

calibração reversa implantada aqui em escala regional ter sido considerada satisfatória, tendo uma boa validação do modelo, apesar das limitações e incertezas associadas.

Recomenda-se ainda que continue sendo efetuadas as coletas e análises isotópicas principalmente de águas de chuva e de poços, e incluir metodologia de investigação que estime quantitativamente o tempo de residência da água entre a recarga e a descarga dos poços, que possibilitará estudos inclusive sobre questões de contaminação por agrotóxicos.

Importante ressaltar a relevância do monitoramento hidroclimatológico sistemático e contínuo em toda a região que auxilia na entrada de dados para análises temporais e conseqüentemente para servir de suporte à tomada decisões na governança das águas dado seu caráter dinâmico, contribuindo assim para uma gestão sustentável. Como a confiabilidade de um modelo é maior quanto maior for a série histórica utilizada para teste e calibração, recomenda-se que o modelo atual seja continuamente testado e aperfeiçoado a medida que novas informações forem sendo adquiridas.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DE CO-AUTORES

Artigo 1- Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucua Aquifer System in Bahia – Brazil.

Artigo aceito em 15 de Outubro de 2019 e publicado em janeiro de 2020 na Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science .

Autores: Leanize Teixeira Oliveira; Harald Klammler; Luiz Rogério Bastos Leal; Eduardo Moussale Grissolia.

Harald Klammler – Dr. Klammler recebeu seu PhD em Engenharia Civil na Graz University of Technology, Austria. Suas atividades de pesquisa tem sido focada em aspectos hidro(geo)lógicos de aquíferos e bacias hidrográficas. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Acesso Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2687932024943414>. Contribuiu na orientação da pesquisa, interpretação dos dados e revisão do texto como co-orientador.

Luiz Rogério Bastos Leal – Geólogo Pós-Doutor em Hidrogeologia. Professor Titular da UFBA, Instituto de Geociências. Acesso lattes: <http://lattes.cnpq.br/6409332830031336>. Contribuiu na orientação da pesquisa como Orientador.

Eduardo Moussale Grissolia – Graduado em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil desde 2008, atuando nas áreas de Mapeamento Geológico, Avaliação de Recursos Minerais, Economia Mineral e Geologia Exploratória e com especialização em aquisição, processamento e interpretação de dados geofísicos em Offshore. Contribuiu no processamento e interpretação da modelagem geológica.

Artigo 2- Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia

Artigo submetido à Revista Águas Subterrâneas, aceito em 28 de agosto de 2020 e publicado em setembro de 2020.

Autores: Leanize Teixeira Oliveira; Harald Klammler & Luiz Rogério Bastos Leal.

Harald Klammler – Dr. Klammler recebeu seu PhD em Engenharia Civil na Graz University of Technology, Austria. Suas atividades de pesquisa tem sido focada em aspectos hidro(geo)lógicos de aquíferos e bacias hidrográficas. Atualmente é professor adjunto do Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. Acesso Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2687932024943414>. Contribuiu na orientação da pesquisa, interpretação dos dados e revisão do texto como co-orientador. Contribuiu na orientação da pesquisa, interpretação dos dados e revisão do texto como co-orientador.

Luiz Rogério Bastos Leal – Geólogo Pós-Doutor em Hidrogeologia. Professor Titular da UFBA, Instituto de Geociências. Acesso lattes: <http://lattes.cnpq.br/6409332830031336>. Contribuiu na orientação da pesquisa como Orientador.

APÊNDICE B – TABELA DE DADOS

B1. Dados de precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) e recarga

Data	Estação Rio do Meio (1345012)				Estação Prata (01445007)				Estação Correntina (83286)			
	P	ETP	ETR	Recarga	P	ETP	ETR	Recarga	P	ETP	ETR	Recarga
01/11/2005	376.29	128.2	128.2	248.05	253.9	128.8	128.8	125.0	192.9	127.3	127.3	65.6
01/12/2005	261.47	127.1	127.1	134.41	177.8	126.3	126.3	51.5	361.9	112.7	112.7	249.2
01/01/2006	98.01	106.1	105.7	0.00	69.6	105.6	76.0	0.0	47.1	118.2	78.2	0.0
01/02/2006	109.64	103.5	103.5	6.17	77.3	104.5	81.0	0.0	136.9	116.9	116.9	20.0
01/03/2006	275.41	102.9	102.9	172.55	187.1	102.2	102.2	84.8	169.7	114.8	114.8	54.9
01/04/2006	95.79	89.3	89.3	6.51	68.1	87.4	82.5	0.0	62.1	98.4	92.5	0.0
01/05/2006	43.31	74.9	69.1	0.00	33.3	71.0	55.7	0.0	4.8	80.2	41.6	0.0
01/06/2006	0.00	58.1	26.5	0.00	0.0	52.7	21.9	0.0	4.3	60.0	18.3	0.0
01/07/2006	0.00	62.6	12.8	0.00	0.0	57.4	15.4	0.0	0.0	65.3	9.0	0.0
01/08/2006	0.00	82.5	6.6	0.00	0.0	79.6	12.4	0.0	0.0	74.4	5.1	0.0
01/09/2006	40.41	102.3	42.2	0.00	31.4	102.8	37.5	0.0	15.4	115.3	18.3	0.0
01/10/2006	184.59	120.4	120.4	64.16	126.9	122.9	122.9	4.0	145.0	137.7	137.7	7.3
01/11/2006	158.83	100.0	100.0	58.85	109.8	99.4	99.4	10.4	175.9	111.3	111.3	64.6
01/12/2006	163.08	109.7	109.7	53.34	112.7	109.9	109.9	2.8	104.1	122.9	116.7	0.0
01/01/2007	133.45	119.2	119.2	14.26	93.0	121.0	102.6	0.0	119.1	135.9	134.5	0.0
01/02/2007	266.09	89.4	89.4	176.73	180.9	87.9	87.9	92.9	213.9	98.8	98.8	115.1
01/03/2007	36.63	97.4	78.3	0.00	28.9	95.8	80.7	0.0	10.6	107.8	72.8	0.0
01/04/2007	85.27	92.6	88.4	0.00	61.1	91.2	76.8	0.0	69.1	102.8	79.9	0.0
01/05/2007	38.11	89.6	53.1	0.00	29.9	87.4	51.1	0.0	0.0	98.8	16.9	0.0
01/06/2007	0.00	67.2	9.0	0.00	0.0	62.6	14.3	0.0	0.0	71.1	5.1	0.0
01/07/2007	0.00	65.7	3.6	0.00	0.0	60.6	8.5	0.0	0.0	68.9	2.5	0.0
01/08/2007	0.00	80.6	1.7	0.00	0.0	77.3	6.2	0.0	0.0	105.7	3.3	0.0
01/09/2007	0.00	97.0	0.6	0.00	0.0	96.5	3.9	0.0	0.0	108.8	0.7	0.0
01/10/2007	67.64	130.3	67.8	0.00	49.4	134.9	51.1	0.0	34.4	151.9	34.7	0.0
01/11/2007	121.36	135.8	121.4	0.00	85.0	141.9	85.6	0.0	41.9	159.5	42.0	0.0
01/12/2007	225.38	107.4	107.4	118.03	153.9	107.1	107.1	46.8	265.8	120.2	120.2	145.6
01/01/2008	120.81	107.0	107.0	13.82	84.7	106.7	104.8	0.0	61.6	119.2	105.4	0.0
01/02/2008	102.81	100.1	100.1	2.75	72.7	100.5	93.6	0.0	126.1	112.4	112.4	13.7
01/03/2008	204.61	98.1	98.1	106.50	140.2	96.7	96.7	43.4	118.0	108.4	108.4	9.6
01/04/2008	148.31	90.7	90.7	57.57	102.9	89.2	89.2	13.7	106.6	100.0	100.0	6.6
01/05/2008	0.00	80.6	49.4	0.00	0.0	77.2	57.6	0.0	0.0	86.9	50.0	0.0
01/06/2008	0.00	64.3	14.7	0.00	0.0	59.4	25.5	0.0	0.0	67.1	17.7	0.0
01/07/2008	0.00	67.3	6.4	0.00	0.0	62.4	16.5	0.0	0.0	102.4	17.1	
01/08/2008	0.00	80.7	2.9	0.00	0.0	77.5	11.8	0.0	0.0	87.2	5.2	0.0
01/09/2008	47.34	102.3	48.1	0.00	36.0	102.6	41.6	0.0	24.8	115.2	27.0	0.0
01/10/2008	64.41	133.7	64.8	0.00	47.3	139.0	51.5	0.0	0.0	156.2	1.2	0.0
01/11/2008	324.70	110.4	110.4	214.34	219.7	111.5	111.5	108.2	355.5	124.8	124.8	230.7
01/12/2008	184.68	105.0	105.0	79.63	127.0	104.4	104.4	22.6	169.5	116.7	116.7	52.8
01/01/2009	219.57	106.7	106.7	112.83	150.1	106.8	106.8	43.2	182.9	122.3	122.3	60.6
01/02/2009	117.21	95.7	95.7	21.55	82.3	95.3	94.6	0.0	56.9	109.6	97.9	0.0
01/03/2009	158.10	110.7	110.7	47.40	109.4	111.4	111.2	0.0	36.0	127.0	71.3	0.0
01/04/2009	238.49	88.3	88.3	150.19	162.6	86.3	86.3	76.3	251.1	100.9	100.9	150.2
01/05/2009	97.18	71.9	71.9	25.24	69.0	67.4	67.4	1.6	95.5	81.7	81.7	13.8
01/06/2009	35.52	63.3	58.7	0.00	28.2	58.4	55.0	0.0	1.9	71.7	52.1	0.0
01/07/2009	0.00	65.6	30.2	0.00	0.0	60.6	37.7	0.0	0.0	74.3	26.1	0.0
01/08/2009	0.00	82.7	14.4	0.00	0.0	79.7	28.5	0.0	0.0	94.3	14.5	0.0
01/09/2009	78.35	115.9	81.2	0.00	56.5	118.7	69.0	0.0	34.3	133.4	40.1	0.0
01/10/2009	303.93	125.9	125.9	178.04	205.9	129.5	129.5	76.4	0.0	85.8	4.1	
01/11/2009	97.36	105.7	105.2	0.00	69.1	105.9	93.5	0.0	71.7	121.2	73.0	0.0
01/12/2009	329.96	104.9	104.9	225.02	223.2	104.3	104.3	118.9	263.0	120.3	120.3	142.7

01/01/2010	136.87	105.7	105.7	31.12	95.3	105.1	102.5	0.0	29.8	120.9	89.6	0.0
01/02/2010	68.93	102.3	95.9	0.00	50.3	103.2	80.6	0.0	30.2	117.4	53.6	0.0
01/03/2010	298.30	103.9	103.9	194.37	202.2	103.5	103.5	98.7	203.3	119.0	119.0	84.3
01/04/2010	139.27	86.6	86.6	52.66	96.9	84.3	84.3	12.5	45.0	98.7	86.5	0.0
01/05/2010	36.07	90.2	74.6	0.00	28.5	88.3	76.0	0.0	8.2	102.9	44.0	0.0
01/06/2010	0.00	63.5	20.8	0.00	0.0	58.7	29.0	0.0	0.0	71.3	11.6	0.0
01/07/2010	0.00	67.0	9.2	0.00	0.0	62.1	19.0	0.0	0.3	75.6	6.2	0.0
01/08/2010	0.00	70.3	3.9	0.00	0.0	65.8	12.1	0.0	0.0	79.6	2.9	0.0
01/09/2010	47.80	104.8	49.1	0.00	36.3	105.6	43.7	0.0	2.7	118.6	6.5	0.0
01/10/2010	114.16	131.4	114.4	0.00	80.3	136.0	83.9	0.0	168.5	151.4	151.4	17.1
01/11/2010	276.05	104.6	104.6	171.48	187.5	104.7	104.7	82.8	223.2	119.8	119.8	103.4
01/12/2010	161.97	106.4	106.4	55.56	111.9	106.0	106.0	5.9	247.3	121.7	121.7	125.6
01/01/2011	175.45	102.5	102.5	72.97	120.8	101.4	101.4	19.4	266.2	115.8	115.8	150.4
01/02/2011	169.63	93.7	93.7	75.93	117.0	93.1	93.1	23.9	55.1	106.2	95.1	0.0
01/03/2011	233.41	99.1	99.1	134.33	159.2	97.9	97.9	61.3	152.6	111.9	111.9	40.7
01/04/2011	79.09	89.6	88.9	0.00	57.0	87.9	84.4	0.0	28.1	101.0	79.9	0.0
01/05/2011	32.20	77.2	61.6	0.00	26.0	73.5	56.8	0.0	0.4	86.1	28.2	0.0
01/06/2011	0.00	68.0	21.3	0.00	0.0	63.8	26.7	0.0	0.0	75.5	10.8	0.0
01/07/2011	0.00	69.0	8.7	0.00	0.0	65.0	16.2	0.0	0.0	73.0	8.5	0.0
01/08/2011	0.00	83.4	3.9	0.00	0.0	80.7	11.3	0.0	0.0	93.6	5.9	0.0
01/09/2011	0.00	87.1	1.3	0.00	0.0	85.1	6.2	0.0	0.0	98.2	2.4	0.0
01/10/2011	106.32	115.4	106.4	0.00	75.1	117.0	76.9	0.0	134.6	131.3	131.3	3.3
01/11/2011	247.81	94.6	94.6	153.24	168.8	93.1	93.1	75.7	166.9	106.6	106.6	60.3
01/12/2011	300.61	100.7	100.7	199.95	203.7	99.4	99.4	104.3	288.4	113.6	113.6	174.8
01/01/2012	246.70	98.6	98.6	148.08	168.0	96.9	96.9	71.1	104.0	112.6	106.5	0.0
01/02/2012	67.46	87.3	84.9	0.00	49.3	85.7	80.9	0.0	151.6	99.6	99.6	52.0
01/03/2012	122.19	104.4	104.4	17.81	85.6	104.0	98.4	0.0	149.5	119.4	119.4	30.1
01/04/2012	37.09	92.5	76.3	0.00	29.2	91.1	60.7	0.0	31.9	105.6	84.1	0.0
01/05/2012	47.89	85.8	62.1	0.00	36.4	83.3	51.7	0.0	7.1	97.8	35.6	0.0
01/06/2012	0.00	73.8	13.5	0.00	0.0	70.2	14.5	0.0	0.0	83.7	10.9	0.0
01/07/2012	0.00	65.3	4.7	0.00	0.0	60.2	7.4	0.0	0.0	73.5	4.4	0.0
01/08/2012	0.00	73.4	2.1	0.00	0.0	69.1	5.1	0.0	8.2	83.0	10.3	0.0
01/09/2012	36.72	105.0	37.5	0.00	29.0	105.8	32.1	0.0	0.0	108.2	1.1	0.0
01/10/2012	20.38	122.9	20.8	0.00	18.2	126.0	20.3	0.0	19.7	141.3	21.0	0.0
01/11/2012	264.70	100.9	100.9	163.83	180.0	100.3	100.3	79.7	243.0	115.3	115.3	127.7
01/12/2012	141.20	116.8	116.8	24.40	98.2	118.2	110.2	0.0	16.4	134.0	85.5	0.0
01/01/2013	301.35	111.3	111.3	190.06	204.2	111.7	111.7	92.6	108.9	127.6	125.9	0.0
01/02/2013	72.26	103.1	97.5	0.00	52.5	104.1	94.8	0.0	10.2	118.4	65.0	0.0
01/03/2013	229.81	113.6	113.6	116.26	156.9	114.9	114.9	42.0	127.0	130.6	128.0	0.0
01/04/2013	178.96	92.9	92.9	86.10	123.2	91.5	91.5	31.7	29.8	105.8	44.2	0.0
01/05/2013	28.60	88.4	69.8	0.00	23.6	86.2	72.8	0.0	0.2	100.3	8.2	0.0
01/06/2013	33.03	78.0	48.3	0.00	26.5	74.9	50.8	0.0	0.0	88.1	2.7	0.0
01/07/2013	0.00	66.0	10.9	0.00	0.0	60.9	19.8	0.0	0.0	114.9	1.8	0.0
01/08/2013	0.00	80.8	5.1	0.00	0.0	77.4	14.6	0.0	0.0	91.1	1.2	0.0
01/09/2013	30.17	110.8	31.9	0.00	24.6	112.7	33.2	0.0	1.2	127.8	1.8	0.0
01/10/2013	92.93	117.9	93.2	0.00	66.2	120.2	69.1	0.0	92.8	136.0	92.9	0.0
01/11/2013	186.43	107.1	107.1	79.37	128.1	107.5	107.5	20.6	330.0	122.8	122.8	207.2
01/12/2013	382.75	100.3	100.3	282.46	258.1	98.9	98.9	159.3	346.6	114.2	114.2	232.4
01/01/2014	96.07	104.3	103.9	0.00	68.3	104.5	151.2	0.0	3.0	119.2	41.5	0.0
01/02/2014	106.32	94.1	94.1	12.26	75.1	94.3	81.1	0.0	98.7	107.5	100.2	0.0
01/03/2014	190.40	104.4	104.4	85.97	130.8	104.9	104.9	25.8	122.3	119.6	119.6	2.7
01/04/2014	93.58	92.5	92.5	1.08	66.6	92.0	78.0	0.0	66.3	105.6	72.4	0.0
01/05/2014	58.60	87.2	82.4	0.00	43.5	85.8	58.0	0.0	14.0	99.2	21.3	0.0
01/06/2014	0.00	71.2	31.4	0.00	0.0	68.3	15.1	0.0	0.0	80.3	3.0	0.0
01/07/2014	0.00	73.4	12.4	0.00	0.0	70.4	9.0	0.0	0.0	82.7	1.4	0.0
01/08/2014	0.00	80.7	4.9	0.00	0.0	78.4	5.5	0.0	0.0	138.7	2.2	0.0
01/09/2014	0.91	107.9	2.8	0.00	0.0	109.8	3.7	0.0	10.1	124.2	10.8	0.0
01/10/2014	32.81	124.3	33.2	0.00	29.9	92.0	31.0	0.0	17.3	143.8	17.5	0.0
01/11/2014	199.70	115.6	115.6	84.13	97.1	112.6	97.2	0.0	189.6	133.2	133.2	56.4

01/12/2014	230.81	107.7	107.7	123.16	135.2	105.7	105.7	29.5	117.7	123.2	120.7	0.0
01/01/2015	68.93	122.7	68.9	0.00	15.0	129.3	15.7	0.0	25.8	133.1	36.4	0.0
01/02/2015	137.01	85.9	85.9	51.12	128.3	90.1	90.1	38.1	178.5	106.6	106.6	71.9
01/03/2015	178.49	98.5	98.5	80.00	53.5	104.3	66.4	0.0	136.1	125.9	125.9	10.2
01/04/2015	161.19	94.9	94.9	66.28	121.5	94.3	94.3	27.1	250.9	113.0	113.0	137.9
01/05/2015	37.40	80.3	70.1	0.00	120.9	75.1	75.1	45.8	46.7	88.9	81.1	0.0
01/06/2015	2.82	64.3	26.5	0.00	0.3	61.6	38.5	0.0	0.0	72.5	33.8	0.0
01/07/2015	3.99	74.2	15.3	0.00	0.1	67.8	25.3	0.0	0.0	79.4	17.4	0.0
01/08/2015	0.00	87.0	5.0	0.00	0.0	61.2	13.6	0.0	0.0	84.4	8.2	0.0
01/09/2015	1.40	129.6	3.3	0.00	0.0	152.1	15.2	0.0	0.0	127.8	4.4	0.0
01/10/2015	35.91	143.0	36.2	0.00	10.2	151.6	14.5	0.0	2.5	145.3	6.0	0.0
01/11/2015	105.47	141.4	105.5	0.00	127.7	144.7	128.0	0.0	128.6	163.8	129.1	0.0
01/12/2015	86.40	146.0	86.4	0.00	63.9	146.4	64.8	0.0	16.5	164.1	17.4	0.0
01/01/2016	388.88	105.4	105.4	283.50	267.3	102.1	102.1	165.2	251.8	129.1	129.1	122.7
01/02/2016	29.68	110.6	79.2	0.00	1.9	120.3	78.4	0.0	0.4	107.7	71.3	0.4
01/03/2016	146.64	121.5	121.5	25.16	96.9	120.0	105.1	0.0	0.0	146.7	76.9	0.0
01/04/2016	2.51	109.4	41.0	0.00	10.1	107.7	31.9	0.0	0.0	127.9	16.7	0.0
01/05/2016	0.33	95.1	9.1	0.00	0.0	93.2	9.7	0.0	0.0	115.6	4.4	0.0
01/06/2016	0.20	75.1	2.4	0.00	6.0	72.8	9.6	0.0	3.6	94.9	4.8	0.0
01/07/2016	0.70	71.6	1.5	0.00	0.2	72.3	2.5	0.0	0.0	66.9	0.5	0.0
01/08/2016	0.09	92.4	0.4	0.00	0.3	94.1	1.8	0.0	0.0	114.4	0.6	0.0
01/09/2016	19.05	105.4	19.1	0.00	39.7	108.9	40.2	0.0	12.5	125.5	12.7	0.0
01/10/2016	104.91	129.3	104.9	0.00	47.5	135.3	47.9	0.0	0.0	145.2	0.1	0.0
01/11/2016	160.56	114.1	114.1	46.44	161.4	113.9	113.9	47.5	0.0	123.0	0.0	0.0
01/12/2016	110.25	116.2	113.8	0.00	98.3	120.0	106.0	0.0	44.4	137.7	44.5	0.0
01/01/2017	146.94	123.4	123.4	23.56	111.4	131.6	130.0	0.0	2.9	154.0	22.8	0.0
01/02/2017	273.81	93.1	93.1	180.75	182.3	91.9	91.9	90.4	188.9	113.4	113.4	75.5
01/03/2017	163.86	110.5	110.5	53.37	122.7	112.1	112.1	10.6	28.7	136.3	82.1	0.0
01/04/2017	35.63	100.8	79.2	0.00	23.9	100.2	81.0	0.0	94.4	118.0	100.2	0.0
01/05/2017	51.98	92.7	65.2	0.00	1.5	90.1	35.9	0.0	3.4	114.0	18.0	0.0
01/06/2017	0.23	69.4	11.2	0.00	0.6	69.3	14.7	0.0	0.0	93.7	4.4	0.0
01/07/2017	0.43	52.5	4.1	0.00	2.3	49.9	8.4	0.0	0.0	67.2	2.6	0.0
01/08/2017	2.31	82.2	4.7	0.00	0.4	81.9	6.7	0.0	0.0	94.6	1.7	0.0
01/09/2017	1.45	88.9	2.3	0.00	0.2	86.0	3.6	0.0	0.0	112.9	0.7	0.0
01/10/2017	5.15	139.0	5.5	0.00	10.2	140.3	12.4	0.0	12.7	145.3	13.2	12.7
01/11/2017	210.92	110.9	110.9	100.00	199.3	108.2	108.2	91.2	141.5	129.2	129.2	12.3
01/12/2017	127.66	109.2	109.2	18.45	160.6	114.0	114.0	46.6	98.2	137.0	106.3	0.0
01/01/2018	169.61	106.0	106.0	63.66	179.3	114.0	114.0	65.3	111.8	136.1	133.4	0.0
01/02/2018	187.13	92.7	92.7	94.41	322.3	95.6	95.6	226.7	304.3	108.6	108.6	195.7
01/03/2018	134.79	105.6	105.6	29.24	115.3	108.9	108.9	6.4	105.3	120.1	119.1	0.0
01/04/2018	43.05	89.2	77.5	0.00	42.2	90.0	81.9	0.0	17.4	100.1	65.9	0.0
01/05/2018	9.47	80.7	34.3	0.00	1.9	82.1	42.3	0.0	0.0	94.1	23.0	0.0
01/06/2018	0.74	66.4	9.9	0.00	2.3	69.2	20.9	0.0	0.0	73.4	7.6	0.0
01/07/2018	1.52	65.6	5.3	0.00	3.7	65.7	14.0	0.0	0.0	68.2	3.5	0.0
01/08/2018	7.77	92.2	9.6	0.00	12.3	96.1	20.1	0.0	0.8	105.9	3.1	0.0
01/09/2018	1.48	114.1	2.2	0.00	0.0	118.0	5.0	0.0	0.0	131.8	0.9	0.0
01/10/2018	161.43	132.3	132.3	29.15	89.6	137.7	90.6	0.0	137.8	165.9	137.9	0.0
01/11/2018	374.17	99.3	99.3	274.86	352.5	102.3	102.3	250.2	341.0	113.4	113.4	227.6
01/12/2018	135.53	123.8	123.8	11.69				19.4	165.1	113.4	113.4	51.7

Fonte:SNIRH/hidroweb/ANA

B2. Dados primários e secundários das análises isotópicas.

AMOSTRA	AMOSTRAS DE RIO								
	Setembro/2016				Dezembro/2016				
	$\delta O^{18}\text{‰}$	Desvio	$\delta D\text{‰}$	Desvio	$\delta O^{18}\text{‰}$	Desvio	$\delta D\text{‰}$	Desvio	
AM01	-5.48	0.11	-30.8	0.7	-5.17	0.27	-31.25	0.8	
AM02	-5.63	0.23	-31.0	0.3	-5.39	0.41	-32.3	0.27	
AM03	-5.09	0.36	-29.3	1.4	-5.41	0.23	-32.3	0.17	
AM04	-5.54	0.57	-31.3	0.9	-5.63	0.27	-33.61	0.36	
AM05	-5.17	0.83	-33.1	0.7	-5.8	0.18	-35.82	0.5	
AM06	-5.60	0.89	-33.3	0.7					
AM07	-6.34	0.71	-34.5	0.6					
AM08	-5.71	0.55	-32.1	0.8					
AM09	-5.68	0.12	-29.3	0.7	-5.58	0.2	-33.04	0.45	
AM10	-5.2	0.45	-26.8	1.4	-5.39	0.26	-31.28	0.26	
AM11	-6.31	0.37	-32.5	0.5	-5.49	0.22	-32.41	0.36	
AM12	-5.74	0.37	-31.5	0.2	-5.63	0.23	-31.53	0.39	
AM13	-7.40	0.63	-34.5	0.7	-5.62	0.22	-32.16	0.82	
AM14	-5.75	0.29	-29.5	0.6	-5.71	0.16	-31.3	0.23	
AM15	-5.5	0.67	-32.9	0.8	-5.78	0.21	-32.07	0.38	
AM16	-5.02	0.66	-28.9	1.4	-5.66	0.24	-31.37	0.31	
AM17	-6.03	0.87	-34.8	0.8					
AM18	-5.01	1.41	-34.1	1.5					
AM19	-4.92	0.26	-28.8	0.9					
AM20	-6.04	0.29	-32	0.5	-6.19	0.17	-36.34	0.34	
AM21	-5.98	0.72	-34.8	0.8	-6.63	0.56	-36.37	0.27	
AM22	-5.72	0.70	-35.3	0.8					
AM23	-5.6	0.56	-32.3	0.7					
AM24	-5.36	0.40	-34.1	0.9	-5.86	0.27	-33.07	0.39	
AM25	7.34	0.41	28.3	1.2					
AM26	-5.52	0.54	-32.9	0.4	-5.93	0.24	-31.85	0.36	
	AMOSTRAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO								
AMOSTRA	Abril/2016				AMOSTRA	Dezembro/2016			
	$\delta O^{18}\text{‰}$	Desvio	$\delta D\text{‰}$	Desvio		$\delta O^{18}\text{‰}$	Desvio	$\delta D\text{‰}$	Desvio
PM56	-5.59	0.99	-35.0	0.8	PT123	-6.38	0.11	-40.89	0.35
PM55	-5.88	0.46	-35.2	0.6	PR010	-5.82	0.23	-37.03	0.62
PM54	-6.92	0.14	-37.9	0.5	PT33	-5.89	0.25	-37.55	0.46
PM53	-6.16	0.39	-38.4	1.9	PT142	-5.72	0.27	-34.16	0.51
PM52	-5.39	0.82	-32.7	0.8	PTCERB	-5.7	0.15	-33.14	0.33
PM50	-5.45	0.46	-30.8	0.6					
PM50	-5.58	0.27	-30.4	0.6					
PM51	-5.75	0.55	-33.5	0.5					
PM49	-6.44	0.23	-33.9	0.4					
PM48	-5.32	0.35	-30.0	0.6					

PM47	-5.89	0.56	-29.1	3.9						
PM46	-5.66	0.47	-31.9	1.0						
PM44	-6.01	0.23	-35.0	0.8						
PM43	-6.06	0.51	-35.4	0.6						
PM42	-5.31	0.36	-29.9	0.7						
PM42	-5.40	0.17	-29.5	0.5						
PM41	-5.55	0.78	-31.4	1.0						
PM40	-7.31	0.59	-36.5	0.8						
	AMOSTRAS DE POÇOS PARTICULARES									
	Outubro/2005		Dezembro/2005		Maio/2006					
AMOSTRA	$\delta O^{18}\text{‰}$	$\delta D\text{‰}$	$\delta O^{18}\text{‰}$	$\delta D\text{‰}$	$\delta O^{18}\text{‰}$	$\delta D\text{‰}$				
PT01	-4.8	-34								
PT03	-4.7	-34								
PT05	-4.4	-32	-4.3	-29						
PT10	-4.4	-33	-4.7	-32	-4.7	-30				
PT12	-4.2	-29	-4.5	-30	-4.5	-27				
PT16	-4.3	-30	-4	-27	-4.3	-25				
PT22	-4.5	-31	-4.7	-33	-4.5	-30				
PT26	-4.5	-33	-4.6	-30						
PT27	-4.6	-32	-4.6	-31	-4.6	-31				
PT31	-4.2	-31	-4.5	-32	-4.6	-29				
PT37	-4.9	-34	-5	-34	-5.1	-33				
PT40	-4.7	-33	-4.7	-32						
PT50	-4.7	-33								
PT54	-4.5	-31	-4.7	-32	-4.8	-31				
PT64	-4.5	-31	-4.6	-32						
PT66	-5.1	-34	-5.2	-34	-5.1	-34				
PT67	-4.9	-33			-4.9	-33				
PT69	-4.9	-34	-4.9	-33	-4.8	-32				
PT70	-3.7	-30	-4.5	-29						
PT72	-4.8	-33	-4.8	-34	-4.8	-32				
PT78	-4.7	-33	-4.6	-31	-4.7	-31				
PT91	-4	-29	-4.3	-30	-4.6	-30				
PT93	-4.3	-32	-4.6	-33	-4.6	-29				
PT100	-3.8	-31	-4.5	-30	-4.5	-29				
PT105	-4.2	-29	-4.1	-28	-4.2	-28				
PT110	-4.3	-31	-4.6	-32	-4.6	-29				
PT123	-4.1	-32	-4.8	-32	-4.8	-33				
PT124	-4.5	-32			-4.6	-30				
PT126	-4.4	-30	-4.5	-29	-4.4	-29				
PT127			-4.4	-28	-4.3	-29				
PT129	-4.2	-30								
PT132	-4.5	-30			-4.4	-30				
PT133	-4.6	-33	-4.6	-31	-4.8	-33				

PT134	-4.9	-33	-4.9	-32		
PT135	-4.9	-33	-4.9	-32	-5	-33
PTE					-4.4	-30
PTA					-4.9	-34
	AMOSTRAS DE CHUVA					
	DEZEMBRO/2005		MAIO/2015			
	$\delta O^{18}\text{‰}$	$\delta D\text{‰}$	$\delta O^{18}\text{‰}$	Desvio	$\delta D\text{‰}$	Desvio
CH1	-3.6	-20				
C1			-6.57	0.83	-35.4	0.5
C2			-6.23	0.70	-33.6	0.8
C3			-4.85	0.26	-19.0	0.4

Fonte: Dados da autora e CPRM 2008.

TIPO RESERVATÓRIO	AMOSTRAS ANALISADAS PARA TRÍCIO		
	AMOSTRAS	^3H (UT)	Erro analítico
ÁGUAS SUPERFICIAIS	AM 02	0.32	0.14
ÁGUAS SUPERFICIAIS	AM 11	0.34	0.15
ÁGUAS SUPERFICIAIS	AM 21	0.48	0.15
POÇO	PT 33	0.09	0.15
POÇO	PT 123	0.92	0.19
POÇO	PT CERB	0.72	0.16
POÇO	PT 142-T1	0.43	0.14
POÇO	PR 010	0.14	0.12

Fonte: Dados da autora.

**APÊNDICE C – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS
AMOSTRADOS NAS ANÁLISES ISOTÓPICAS DAS
AMOSTRAS DE CHUVA, RIOS E POÇOS E DOS POÇOS DE
MONITORAMENTO**

ÁGUAS SUPERFICIAIS			
CÓDIGO	LOCAL	X	Y
AM01	RIO CORRENTE	-44.34	-13.40
AM02	RIO CORRENTE-CORRENTINA	-44.64	-13.34
AM03	RIO ARROJADO	-44.57	-13.45
AM04	POV. ARRODEADOR, FORMOSO	-44.56	-13.67
AM05	POV. GATOS, FORMOSO	-44.64	-13.71
AM06	RIO FORMOSO	-44.78	-13.79
AM07	RIO PRATUDÃO	-45.22	-13.95
AM08	RIO ARROJADO, FAZ. SININBU	-45.12	-13.67
AM09	RIO ARROJADO	-45.30	-13.74
AM10	RIO DAS EGUAS	-45.05	-13.48
AM11	RIO ARROJADO, POV PRAIA	-44.73	-13.52
AM12	RIO DAS EGUAS	-44.79	-13.39
AM13	RIO DAS EGUAS	-45.39	-13.52
AM14	POV. CORRENTE	-45.67	-13.54
AM15	RIO ARROJADO	-45.67	-13.74
AM16	RIO VEREDÃOZINHO	-45.60	-13.87
AM17	RIO PRATUDÃO	-45.51	-14.06
AM18	APÓS BREJÃO	-45.69	-14.15
AM19	LAGOA PRATUDINHO	-45.90	-14.44
AM20	RIO FORMOSO	-45.83	-14.67
AM21	RIO FORMOSO	-45.73	-14.57
AM22	RIO FORMOSO	-45.43	-14.32
AM23	RIO PRATUDINHO	-45.47	-14.10
AM24	RIO PRATUDINHO	-45.84	-14.38
AM25	LAGOA PRATUDÃO	-45.91	-14.30
AM26	FAZ. FLORYL	-46.01	-13.93
R1	RIO VEREDÃOZINHO	-46.00	-13.93
R2	RIO ARROJADO	-45.84	-14.38
R3	RIO FORMOSO	-45.83	-14.66
R4	RIO FORMOSO	-45.42	-14.01
R5	RIO ARROJADO	-45.12	-13.67
R6	RIACHO TRÊS GALHOS	-45.31	-14.32
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS			
CÓDIGO	LOCAL	X	Y
PT 001	FAZ. NOVA ESPERANÇA	-45.37	-13.91
PT 003	CARVOARIA	-45.37	-13.83
PT 005	FAZ. OURO VERDE	-45.47	-13.97

PT 010	FAZ. ENTRE RIOS	-44.96	-13.48
PT012	FAZ. SÃO MARCOS	-45.30	-13.62
PT 016	FAZ. FLOR DA SERRA I	-46.15	-14.10
PT 022	FAZ. PORTA DO CÉU	-45.85	-14.11
PT 026	FAZ. CRISTO REI	-45.99	-14.26
PT 027	FAZ. STA. BÁRBARA	-45.87	-14.47
PT 031	FAZ. OURO BRANCO	-45.87	-14.59
PT 033	FAZ. SÃO MIGUEL	-45.85	-14.59
PT 037	FAZ. VARGAS	-45.71	-14.35
PT 040	FAZ. PROSPERIDADE	-45.75	-14.43
PT 050	FAZ. SOL NASCENTE	-45.93	-14.69
PT 054	Faz. BARREIRO	-45.87	-14.20
PT 064	FAZ. TERRA NORTE	-45.76	-14.12
PT 066	FAZ. AGROPECUÁRIO TRIÂNGULO	-45.64	-14.19
PT 067	FAZ. TEXAS	-45.72	-14.25
PT 069	FAZ. PORTO LUCENA	-45.68	-14.06
PT 070	FAZ. ENTRE RIOS	-45.73	-13.99
PT 072	FAZ. LEITE VERDE II	-45.77	-14.61
PT 078	FAZ. AGRÍCOLA CAFÉ	-45.78	-14.67
PT 091	CHACARA GOBBI	-46.20	-13.96
PT 093	FAZ. CABECEIRA GRANDE	-46.24	-13.95
PT 100	FAZ. N. SRA FÁTIMA	-46.19	-13.89
PT 105	FAZ. CHANCHERÊ	-46.10	-13.79
PT 110	FAZ. DELTA	-45.97	-13.78
PT 123	FAZ. STA FELICIDADE	-45.69	-13.78
PT 124	FAZ. SRA. APARECIDA	-45.63	-13.84
PT 126	FAZ. CURITIBA	-45.61	-13.70
PT 129	FAZ. BURITI	-45.50	-13.68
PT 132	FAZ. CONQUISTA	-45.13	-13.76
PT 133a	FAZ. SINIMBU	-45.16	-13.86
PT 134	FAZ. TOMIX	-45.40	-14.33
PT 135	FAZ. TRÊS MARIAS	-45.71	-14.57
PT E	FAZ. TRIJUNÇÃO	-46.00	-14.83
PTA	FAZ. TRIJUNÇÃO	-46.01	-14.80
PT142	FAZ. CHAPADÃO ALEGRE	-45.25	-13.42
PTCERB	ROSÁRIO	-46.21	-13.95
PR010	FAZ. VALE DO ARROJADO	-45.99	-13.78
PE02	ASSENTAMENTO	-45.99	-14.28
PE01	LOTEAMENTO TREVISÓ	-45.37	-13.62
ÁGUAS DE CHUVA			
CÓDIGO	LOCAL	X	Y
C1	FAZ. CONQUISTA	-45.13	-13.76
C2	FAZ. SÃO JOSÉ	-45.89	-13.70
C3	FAZ. SÃO MIGUEL	-45.86	-14.58

CH1	FAZ. TROPEIRO	-45.84	-14.07
-----	---------------	--------	--------

ESTAÇÕES	LOCAL	X	Y
PM08	ASSENTAMENTO	-45.99	-14.28
PM39	FAZ. STO. ANTONIO	-45.13	-13.40
PM44	FAZ. CONQUISTA	-45.13	-13.76
PM46	FAZ. SÃO JOSÉ	-45.89	-13.70
PM47	FAZ. JATOBÁ	-45.84	-13.90
PM48	FAZ. ARROJADINHO	-45.55	-13.93
PM50	PLANALTO DAS EMAS	-46.15	-14.10
PM53	POSTO DE COLETA	-46.18	-13.87
PM54	FAZ. PRATA	-45.47	-14.14
PM55	FAZ. SÃO MIGUEL	-45.85	-14.59
PM56	LOTEAMENTO TREVISO	-45.37	-13.62

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA AMBIENTE & ÁGUA – AN INTERDISCIPLINARY JOURNAL OF APPLIED SCIENCE

Formatação do texto:
O artigo deverá ser submetido em formato texto (MS Office), não restringido por password para permitir edição. A publicação final será em pdf, html, epdf e xml. O artigo deve ser submetido com as seguintes características:

- **Linguagem:** Inglês de qualidade (EUA ou RU)
- **Tamanho da página:** equivalente ao tamanho do papel A4 (210 x 297 mm);
- **Margens (superior, inferior, esquerda e direita):** 2,5 cm;
- **Fonte:** Times New Roman, 12, espaço entrelinhas simples, em uma única coluna, com parágrafos alinhados à esquerda e à direita;
- **Tamanho:** os artigos serão analisados com base na qualidade e contribuição científica. Deverão ter no máximo de 10 páginas incluindo tabelas e figuras, que não devem ultrapassar o número de cinco (figuras mais tabelas). Nosso custo editorial é proporcional ao tamanho do artigo. Assim, artigos maiores são possíveis, porém, páginas adicionais a 10 serão cobradas, contadas após layout padrão da revista e após aceitação do artigo para publicação.
- Nos artigos em inglês, o título, resumo e palavras-chave deverão ser escritos também em português, sempre em ordem alfabética independente do idioma.
- **Primeira página:**

Deverá conter apenas o título do trabalho, resumo e as palavras-chave, em letras minúsculas, separadas por “vírgula” e um ponto final após a última palavra-chave. Não deverá conter o nome dos autores, afiliação ou e-mail.

- **Tabelas e Figuras:**

Deverão ser numeradas com algarismos arábicos consecutivos, indicados no texto e anexadas no local do artigo mais próximo e depois da chamada. Os títulos das figuras deverão aparecer na sua parte inferior, antecidos da palavra **Figura** (notar a primeira letra maiúscula e em negrito), um espaço, mais o seu número de ordem em negrito, um ponto e espaço de um caractere, fonte 11, justificado, tabulado nos limites da figura, observando que o título da figura logo abaixo dela, não é em negrito. Os títulos das tabelas deverão aparecer na parte superior e antecidos pela palavra **Tabela** (notar a primeira letra maiúscula e em negrito), um espaço, mais o seu número de ordem (**em negrito**), um ponto e espaço de um caractere, fonte 11, justificado. Nas figuras e tabelas, quando houver uma fonte de referência, a palavra “Fonte:” vem na parte inferior, seguida da referência, fonte 10, justificado. Títulos de tabelas, figuras e a fonte terminam sempre com ponto final. As figuras poderão ser coloridas, porém com boa resolução (300 dpi), contudo, os autores devem explorar todas as possibilidades para que o tamanho do arquivo não fique grande, mas preservando a qualidade das figuras.

As tabelas devem ser sempre inseridas **como texto**, jamais como figuras/imagens e não usar espaços ou “tabs” para formatar e sim tamanho das células/colunas/linhas. Todas as colunas devem ter um título.

Figuras devem ter fontes legíveis, atentar para o tamanho do texto, alta resolução e inseridas como objeto quando se tratar de gráficos. Figuras não devem ter título na parte superior, só a legenda abaixo dela. Certifique-se de que elas sejam editáveis.

É possível inserir imagens em documentos sem deixar os arquivos grandes, basta seguir as instruções

abaixo:

Utilize arquivos de imagem em formato JPG, PNG ou GIF. Estes arquivos costumam ter bons padrões de qualidade e não consomem muito espaço em disco e memória;

Para inserir as figuras, não use Copiar/Colar (ou Ctrl+C/Ctrl+V), salve em seu computador as imagens que deseja inserir no documento;

Em seguida, acesse a opção de menu disponível para inserção de imagem do seu editor de texto (Ex: no MSWord e selecione a opção Inserir/Figura/do arquivo) e localize a imagem que deseja inserir no documento. Para finalizar, insira a imagem selecionada no texto.

Figuras que contêm mais de um gráfico ou imagem, designá-los com letras maiúsculas (sem parênteses e sem pontos após as letras) no canto superior esquerdo de cada painel, se possível.

Para as equações, usar o editor Equation do Microsoft Word ou MathType. Devem ser numeradas com a numeração entre parênteses e chamadas previamente no texto.

Envie as tabelas separadamente em Excel.

• **Nota importante dos manuscritos em inglês:** Todos os manuscritos escritos devem ser submetidos em inglês a partir de janeiro de 2017. Autores que não têm Inglês como primeira língua, devem ter seus manuscritos revisados por um profissional com bom conhecimento de Inglês para revisão do texto (vocabulário, gramática e sintaxe). As submissões poderão ser rejeitadas com base na inadequação do texto, sem exame de mérito científico.

- **Estrutura do artigo:**
- **O artigo em INGLÊS deverá seguir a seguinte sequência:**

TÍTULO em inglês, 15, negrito, centralizado, primeira letra maiúscula, demais minúsculas (salvo nomes próprios); ABSTRACT 14, negrito alinhado à esquerda (seguido de três Keywords, 11, negrito alinhado à esquerda em ordem alfabética); TÍTULO DO ARTIGO em português, 15, negrito, centralizado, primeira letra maiúscula, demais minúsculas (salvo nomes próprios); RESUMO (seguido de três Palavras-chave 11, negrito alinhado à esquerda, em ordem alfabética); 1. INTRODUCTION (incluindo revisão de literatura); 2. MATERIALS AND METHODS; 3. RESULTS AND DISCUSSION; 4. CONCLUSIONS; 5. ACKNOWLEDGEMENTS (se for o caso, deve incluir apenas o reconhecimento de agências de financiamento, explicitando o número do processo da agência apoiadora); e 6. REFERENCES. Os títulos de 1 a 6 deverão ser 14, negrito alinhados à esquerda.

Consulte o "Formulário de Avaliação" (http://www.ambi-agua.net/seer/files/review_form.doc) para verificar o conteúdo esperado de cada seção. Verifique os artigos já publicados para ver quais textos devem estar em negrito.

UNIDADES

- **Unidades de medida:** use sistema internacional com espaço após o número, e.g. 10 m ou, por exemplo, 10 km h⁻¹, e não km/h. Observe a consistência toda vez que usar a mesma unidade.
- Verifique todos os símbolos Gregos e todas as figuras cuidadosamente.
- Escreva os números de um a nove por extenso, exceto se forem usados como unidades.
- Use um espaço entre unidades: g L⁻¹, e não g.L⁻¹, ou gL⁻¹ exceto % (e.g. 10%) ou oC (15oC).
- Use o formato 24-h para tempo, com quatro dígitos para horas e minutos: 08h00; 15h30.
- **Subtítulos:** quando se fizerem necessários, serão escritos com letras iniciais maiúsculas, antecedidos de dois números arábicos colocados em posição à esquerda, separados e seguidos por ponto, 12, negrito, alinhados à esquerda.
- **Resumo:** deverá conter os objetivos, a metodologia, os resultados e as conclusões, devendo ser compostos de uma sequência corrente de frases em um único parágrafo e conter, **no máximo, 250 palavras.**
- **Citações:** no texto, as citações deverão seguir as recomendações da ABNT-NBR 10520 com as seguintes especificidades:

Colocar o sobrenome do autor citado com apenas a primeira letra maiúscula, seguido do ano entre parênteses, quando o autor fizer parte do texto. Quando o autor não fizer parte do texto, colocar, entre parênteses, o sobrenome, seguido do ano separado por vírgula. Mais de um autor, separam-se os sobrenomes pela conjunção “e” Mais de dois autores, a expressão et al. é colocada após o primeiro nome, não em itálico. Serão aceitas, preferencialmente, até 15 referências por artigo publicados recentemente na base SciELO (www.scielo.br) ou em revistas internacionais de alto impacto (níveis A/B do Qualis CAPES).

- **Exemplos de como citar:**

Jones (2015), Jones e Smith (2009) ou (Jones, 2015; Jones e Smith, 2009), dependendo da construção da sentença. Mais de dois autores: Jones et al. (2014) ou (Jones et al., 2014). Comunicações pessoais ou dados não publicados não devem ser incluídos na lista de referências; assim como Apud (citação indireta) não será aceita.

- **Referências:**

Sempre que a referência tiver doi, citá-lo no final da referência. Seguirão as recomendações da ABNT-NBR 6023, com especificidades da revista.

- **Exemplos de como escrever as referências bibliográficas:**

- **Livros:**

FALKNER, E. **Aerial Mapping**: methods and applications. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 322 p.

- **Capítulos de livros:**

WEBB, H. Creation of digital terrain models using analytical photogrammetry and their use in civil engineering. In: **Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1991. p. 73-84.

- **Artigos em Periódicos Científicos:**

HADDAD, E.; SANTOS, C. L. dos; FRANCO Jr., R. S. Novas perspectivas sobre o Instituto da desapropriação: a proteção ambiental e sua valoração. **Fórum de direito urbano e ambiental**, Belo Horizonte, ano 6, n. 31, p. 17-25, jan./fev. 2007.
 MEYER, M. P. Place of small-format aerial photography in resource surveys. **Journal of Forestry**, Washington, v. 80, n. 1, p. 15-17, 1982.
 Observar que é importante identificar a cidade da edição e colocar um espaço entre as iniciais dos nomes.

- **Trabalhos apresentados em eventos (Impresso)** (devem ser evitados, se essenciais):

DAVIDSON, J. M.; RIZZO, D. M.; GARBELOTTO, M.; TJOSVOLD, S.; SLAUGHTER, G. W. *Phytophthora ramorum* and sudden oak death in California: II Transmission and survival. In: SYMPOSIUM ON OAK WOODLANDS: OAKS IN CALIFORNIA'S CHANGING LANDSCAPE, 5. 23-25 Oct. 2001, San Diego, **Proceedings...** Berkeley: USDA Forest Service, 2002. p. 741-749.

- **Trabalhos apresentados em eventos (meio eletrônico)** (devem ser evitados, se essenciais):

COOK, J. D.; FERDINAND, L. D. 2001. Geometric fidelity of Ikonos imagery. In: Annual Convention of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 23-27 Apr., St. Louis. **Proceedings...** St. Louis: ASPRS, 2001. 1 CD-ROM.

- **Teses e Dissertações:** Procurar citar os artigos derivados de teses e dissertações em revistas científicas, se não foram ainda publicados e essenciais, use a forma:

AFFONSO, A. G. **Caracterização de fisionomias vegetais na Amazônia oriental através de videografia aerotransportada e imagens LANDSAT 7 ETM+**, 2003, 120f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

- **Referências de sites na Internet** (não devem ser citadas, se absolutamente essenciais):

DIAZ, H. F. Precipitation trends and water consumption in the southwestern United States. In: United States Geological Survey, 1997, Reston. **Web Conference...** Disponível em: <<http://geochange.er.usgs.gov/sw/changes/natural/diaz/>>. Acesso em: 15 julho 2014.

Importante:

O arquivo submetido (*uploaded*) não deve conter **nenhuma identificação dos autores**, portanto, sem nome dos autores, afiliação ou e-mail. Agradecimentos são desejáveis, mas serão editados para evitar a identificação dos autores até ter sido aceito para publicação. Contudo, o autor correspondente deverá submeter como arquivo suplementar, uma **Carta de Apresentação**.

As propriedades do arquivo de submissão que identificam a origem devem ser retiradas. Instruções:

Word**2010:**

Em Arquivo, ir à aba **Informações, Verificando Problemas, Inspeccionar Documento** e desmarcar a janela de **Propriedades do Documento e Informações Pessoais, Fechar, e Salvar**.

Word**2003**

Ir à aba **Opções, Segurança** e eliminar a propriedade de **Autoria** do arquivo.

Todo o conteúdo do artigo é de responsabilidade exclusiva dos autores.

Cada edição publicada pela Ambi-Agua apresenta uma imagem representativa de um artigo publicado naquela edição que vai ser capa do número. Autores são convidados a destacar na carta que eles gostariam de ter determinada figura considerada como capa por ser cientificamente interessante e visualmente atraente para a revista. As imagens devem ser de alta resolução (300 dpi) e devem ter aproximadamente 17 por 17 cm. As imagens devem ser originais, e os autores concedem à Revista Ambiente & Água licença para sua publicação. Caso deseje, submeter a imagem como um arquivo adicional suplementar. Os autores devem deter os direitos autorais das imagens apresentadas, sendo os únicos responsáveis pela permissão de uso delas.

Em qualquer caso, os autores concedem à Ambi-Agua a licença para usar qualquer imagem do manuscrito publicado para ser usada como imagem de capa da edição, mesmo que não tenha sido expresso na Carta de Apresentação, a menos que expressamente informem o contrário.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Orientações para Preparação de Artigo Científico

O trabalho submetido para avaliação preliminar deverá ser submetido em programa Word for Windows ou compatível, fonte Arial, tamanho 12, espaçamento duplo, em papel A4, margens de 2,5 cm, sem numeração de páginas e ter, no máximo, **6.000 (seis mil) palavras, já incluindo tabelas, e 10 (dez) figuras.**

O documento deverá ter a numeração de linhas visível e contínua a partir do seu título, visando acelerar o processo de revisão pelos pares.

IMPORTANTE: O(s) nome(s) do(s) autor(es), sua(s) instituição(ões) e endereço(s) para correspondências NÃO DEVEM CONSTAR do texto, a identificação do trabalho será feita pelo preenchimento dos metadados da submissão e pelo número de identificação gerado automaticamente. Referências a publicação(ões) do(s) autor(es) dentro do texto ou na lista de referências devem aparecer somente como "AUTOR", de modo a garantir uma avaliação cega segura.

Serão aceitos trabalhos em **Português, Espanhol e Inglês** e serão publicados no idioma em que foi redigido originalmente. Os artigos deverão, obrigatoriamente, apresentar resumo em Português e Inglês. Além disso, caso o idioma escolhido não seja o Português, o título deverá obrigatoriamente ser apresentado secundariamente nesse idioma, sendo mantido o título original no idioma do artigo. O **título** do trabalho, com no máximo 140 toques, deverá aparecer na primeira página do trabalho, sem a identificação do(s) autor(es).

Antecedendo o texto serão apresentados dois **resumos** em Português e Inglês. Para trabalhos redigidos em Espanhol, o segundo resumo será em Português e o terceiro em Inglês. O resumo deverá ser redigido em parágrafo único, variando entre 1.000 a 1.500 toques, apresentando de forma breve e objetiva a justificativa do trabalho, os métodos utilizados, os resultados e as conclusões. Após o resumo, incluir obrigatoriamente uma lista de até cinco palavras-chave que expressem o assunto do trabalho.

O texto deverá ser redigido de forma impessoal, objetiva, clara, precisa e coerente.

O título do trabalho deverá ser apresentado no idioma do trabalho e em Inglês. As abreviaturas deverão ser identificadas, por extenso, na primeira vez que aparecem no texto. As unidades das grandezas numéricas deverão obedecer aos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI).

As **tabelas** serão numeradas sequencialmente e inseridas normalmente dentro do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado no topo da tabela. Outras informações relativas à tabela (origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da tabela, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

As **figuras** (mapas, fotos, perfis, esboços, gráficos, diagramas, etc.), devem ser numeradas sequencialmente. O título deve ser claro e conciso e colocado na base da figura. Outras informações relativas à figura (legenda, origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da figura, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto

principal. As figuras devem ser preparadas em alta resolução (maiores que 1Mb). Para uma boa legibilidade, os símbolos e caracteres de texto das figuras devem ter tamanho mínimo de 1 mm, mesmo após a redução da figura.

As **citações** mencionadas no texto devem ser indicadas pelo sistema Autor-Data, obedecendo a norma ABNT NBR 10.520 (agosto/2002), ou a que estiver vigente.

ANEXO C - COMPROVANTE DE PUBLICAÇÃO DO ARTIGO 1

Revista Ambiente & Água - Decision on Manuscript ID AMBIAGUA-2019-2390.R1

2 mensagens

Nelson W. Dias <onbehalf@manuscriptcentral.com>
Responder a: nwdias@gmail.com
Para: leanize.oliveira@cprm.gov.br, loliva2013@gmail.com

15 de outubro de 2019 15:41

15-Oct-2019

Dear Miss OLIVEIRA:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia - Brazil." in its current form for publication in the Revista Ambiente & Água. The comments of the reviewer(s) who reviewed your manuscript are included at the foot of this letter.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the Revista Ambiente & Água, we look forward to your continued contributions to the Journal.

Sincerely,
Dr. Nelson W. Dias
Editor-in-Chief, Revista Ambiente & Água
nwdias@gmail.com

Associate Editor
Comments to the Author:
Reviewers approved the adjustments made by the authors.



Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia - Brazil

ARTICLES doi:[10.4136/ambi-agua.2390](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2390)

Received: 10 Mar. 2019; Accepted: 15 Oct. 2019

Leanize Teixeira Oliveira^{1,2*} ; Harald Klammler³ 
Luiz Rogério Bastos Leal¹ ; Eduardo Moussale Grissolia⁴ 

ANEXO D - COMPROVANTE DE PUBLICAÇÃO DO ARTIGO

2



Leanize Teixeira Oliveira <leanize.oliveira@cprm.gov.br>

[RAS] Decisão editorial

'Reginaldo Antonio Bertolo' via Águas Subterrâneas <everton@hidroplan.com.br>
 Responder a: Reginaldo Antonio Bertolo <reginaldobertolo@uol.com.br>
 Para: Srta Leanize Teixeira Oliveira <leanize.oliveira@cprm.gov.br>
 Cc: Harald Klammler <haki@ufi.edu>, Luiz Rogério Bastos Leal <lrogerio@ufba.br>

28 de agosto de 2020 12:39

Srta Leanize Teixeira Oliveira e prezados autores,

O manuscrito "Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia" foi aceito para publicação na Revista Águas Subterrâneas. Meus cumprimentos!

Peço a gentileza de aguardarem o contato da equipe de editoração do artigo.

Estou à disposição.

Att,

Reginaldo Antonio Bertolo
 CEPAS IGc USP
 Fone 11.30914243
 reginaldobertolo@uol.com.br

Águas Subterrâneas <http://aguassubterraneas.abas.org/>



Artigos

Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia

Transient water balance of the Southern Urucuia aquifer in Bahia

Leanize Teixeira Oliveira^{1,2}; Harald Klammler³; Luiz Rogério Bastos Leal³

¹ Serviço Geológico do Brasil, Salvador, BA

² Instituto Federal da Bahia (IFBA), Salvador, BA

³ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA

✉ leanize.oliveira@cprm.gov.br, haki@ufi.edu, lrogerio@ufba.br