

Bernardo Ramos Carneiro Leão

**MODELAGEM DE FLUXO E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA
EXTRAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO
URUCUIA NO ESTADO DA BAHIA**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2022

Bernardo Ramos Carneiro Leão

**MODELAGEM DE FLUXO E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA EXTRAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUIFERO URUCUIA NO ESTADO DA
BAHIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

Gerson Cardoso da Silva Junior – UFRJ
Glauco Zely da Silva Eger – UFRJ

Rio de Janeiro
OUTUBRO/2022

Bernardo Ramos Carneiro Leão

Modelagem de fluxo e simulação dos efeitos da extração das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia /
Bernardo Ramos Carneiro Leão - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2022.

58p., 69 f

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2022.

Orientador(es): Gerson Cardoso da Silva Junior, Glauco Zely da Silva Eger

1. Geologia. 2. Hidrogeologia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Gerson Cardoso da Silva Junior. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Modelagem de fluxo e simulação dos efeitos da extração das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia.

Bernardo Ramos Carneiro Leão

MODELAGEM DE FLUXO E SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA EXTRAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA NO ESTADO DA
BAHIA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
em Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito necessário
para a obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Orientador(es):

Gerson Cardoso da Silva Junior – UFRJ
Glauco Zely da Silva Eger – UFRJ

Aprovada em: 13/10/2022

Por:

Orientador: Dr. Gerson Cardoso da Silva Junior, UFRJ

Orientador: Msc. Glauco Zely da Silva Eger, UFRJ

Dr. Nelson Ferreira Fernandes, UFRJ

Dr. Eduardo Antonio Gomes Marques, UFV

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores Gerson Cardoso e Glauco Eger, por toda a parceria e ajuda ao longo do tempo de orientação e por terem aberto as portas, me dando a oportunidade de me aprofundar mais na hidrogeologia através da pesquisa acadêmica, que veio a se tornar uma atividade bastante estimulante e enriquecedora para mim.

Agradeço a toda minha família, principalmente aos meus pais pelo apoio e confiança desde sempre e por me permitirem ter o privilégio de poder escolher dedicar minha vida integralmente aos estudos.

Aos meus amigos que andam ao meu lado desde a infância: Antônio, Gil, Luca, Marinho, Miguel, Tiago e Vicente, pela parceria, carinho e histórias maravilhosas ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos de D.A Joel Valença: Sartori, Vinicius, PV, Julinha, Rapha, Thauan, Mogli, Locatelli, Luan, Bianca e tantos outros que foram importantes ao longo desse período na graduação desde a época do BCMT, com boas risadas e momentos únicos, principalmente em campo.

À minha companheira Julia, por todo carinho e incentivo. Sou imensamente grato pela parceria e amizade desde o início, e pelo apoio em minhas decisões.

A todos os professores do departamento de geologia da UFRJ, por todas as aulas, ensinamentos e conselhos ao longo da graduação.

A todos os meus colegas de INEA, por terem me recepcionado tão bem desde o início e por me proporcionarem um ambiente de trabalho extremamente agradável, com boas conversas e aprendizado.

E por fim, gostaria de dizer que foi uma honra e prazer enorme ter feito minha graduação na UFRJ. É um privilégio poder estudar numa universidade pública de excelência, que se mantém de pé e com qualidade apesar do sucateamento e ataques que vem sofrendo ao longo de tantos anos.

Resumo

LEÃO, Bernardo Ramos Carneiro. **Modelagem de fluxo e simulação dos efeitos da extração das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia**. Rio de Janeiro, Ano. 2022, 55 f. Trabalho Final de Curso – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A região oeste da Bahia é uma importante fronteira agrícola no Brasil que vem passando por mudanças na sua paisagem nas últimas décadas, com a substituição de parte do cerrado por áreas destinadas ao cultivo de culturas como algodão, milho e soja. Devido à baixa densidade de rios nessa região, os pedidos de outorga de uso de águas subterrâneas para a finalidade de irrigação vêm tendo um grande aumento desde o início do século. O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) é um manancial subterrâneo regional, com cerca de 82.000 km² de seus 126.000 km² situados na região oeste da Bahia, sendo a área restante dividida entre os estados vizinhos de Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Maranhão e Piauí. Trata-se de um aquífero predominantemente livre, composto pelos arenitos flúvio-eólicos do Grupo Urucuia. O SAU tem grande importância para a perenidade dos rios da região e para a manutenção das vazões do rio São Francisco, principalmente no período seco. Com o avanço da exploração das águas do SAU foram desenvolvidos estudos que culminaram na implementação da Instrução Normativa nº 3 (IN 3) do INEMA, a fim estabelecer critérios para a perfuração de poços e outorga subterrânea na região oeste da Bahia. Mesmo com as diretrizes da IN 3 são necessárias melhorias no processo de concessão de outorga e gestão integrada dos recursos hídricos no domínio do SAU. Esse estudo tem como objetivo a elaboração de um modelo de fluxo subterrâneo através do *software Visual MODFLOW Classic* e utilização de ferramentas como o *MODPATH* e *ZONEBUDGET* para avaliar os efeitos do bombeamento em duas áreas na bacia do rio Grande, sub-bacia Alto Grande - São Desidério (área Central e área Leste). Foi possível simular oito cenários hipotéticos com bombeamento de água em bateria de poços e avaliar os efeitos na área de estudo através do rebaixamento, balanço hídrico e movimentação do fluxo local. Observou-se um rebaixamento variando de 4 a 8 m na região central e de 10 a 20 m na região leste da área de estudo. O balanço hídrico demonstrou que o volume total bombeado na sub-bacia não chegou a 10% da recarga em nenhum cenário testado. A análise da trajetória do fluxo local mostrou que os poços possuem uma área de influência pequena, que capta parte do fluxo subterrâneo. Com isso, foi demonstrado que o modelo numérico de fluxo construído pode ser utilizado como ferramenta de suporte na análise de processos de outorga e perfuração de poços no oeste da Bahia, de forma mais eficiente que os modelos mais simples utilizados até o momento na região.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Urucuia, MODFLOW, Outorga, Gestão de água subterrânea, Recarga.

Abstract

LEÃO, Bernardo Ramos Carneiro. **Modelagem de fluxo e simulação dos efeitos da extração das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia.** [*Numerical modeling and simulation of the effects of groundwater extraction from the Urucuia Aquifer System in the State of Bahia, Brazil.*] Rio de Janeiro, Ano. 2022, 55 f. Trabalho Final de Curso –Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The Western Region of Bahia State is an important expanding agricultural frontier in Brazil that has been undergoing changes in its landscape in recent decades, with the partial replacement of the Cerrado (Brazilian savannah) by crops such as cotton, corn and soybeans. Due to the low density of rivers in this region, requests for groundwater grants for irrigation have been increasing since the beginning of the century. The Urucuia Aquifer System (UAS) is a regional groundwater reservoir, with about 82,000 km² of its 126,000 km² located in the western region of Bahia, with the remaining area divided between the neighboring states of Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Maranhão, and Piauí. It is a predominantly phreatic aquifer composed of fluvio-eolian sandstones of the Urucuia Group. The UAS has a major role maintaining the baseflow of local rivers and of the São Francisco river, especially in the dry season. With the advance of the exploitation of the UAS groundwater, studies were developed culminating in the implementation of Normative Instruction n^o 3 (IN 3) by INEMA, State of Bahia water and environmental authority, in order to establish a criterion for the drilling of wells and groundwater granting in the western region of Bahia. Even with the IN 3 guidelines, improvements are needed in the granting process and in the integrated management of water resources in the UAS domain. This study aimed at the development of a groundwater numerical model using the Visual MODFLOW Flex software, using engines such as MODPATH and ZONEBUDGET to evaluate the effects of pumping in two areas of the Grande river basin, in the sub-basin Upper Grande - São Desidério (Central and East areas). It was possible to simulate eight hypothetical scenarios with pumping from a battery of wells, and evaluate the effects in the study area through drawdown, water balance, and local flow path lines. Drawdown ranging from 4 to 8 m was observed in the central study area, and from 10 to 20 m in the eastern portion of the study area. The water balance showed that the total volume pumped in the sub-basin did not reach 10% of the recharge in any scenario. The analysis of the local flow path lines showed that the wells have an area of influence that captures part of the groundwater flow. It has been demonstrated that the numerical flow model constructed can be used as a support tool in the analysis of granting and drilling processes in western Bahia, more efficiently than the simpler models used so far in the region.

Key-Words: Urucuia Aquifer System, MODFLOW, Water grants, Groundwater management, Recharge.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Legislação em relação ao limite de uso insignificante e distância mínima entre poços em algumas UFs.	21
Tabela 2 – Cenários hipotéticos para a região central da área de estudo.	33
Tabela 3 – Cenários hipotéticos para a região leste da área de estudo.	34
Tabela 4 - Balanço Hídrico para o modelo inicial.	35
Tabela 5 – Resultados dos cenários de simulação para a região central.	38
Tabela 6 – Resultado dos cenários simulados para a região leste da área de estudo.	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. Os retângulos azuis representam a localização aproximada das áreas de detalhe da modelagem, Central e Leste.	4
Figura 2 - Evolução do uso do solo no oeste da Bahia. Retirado de Mantovani et al. (2019).	5
Figura 3 - Principais bacias hidrográficas do SAU na Bahia. De norte a sul: bacia do Médio Grande, bacia do Alto Grande, bacia do Corrente, bacia do Carinhanha. Retirado de Marques <i>et al.</i> (2020).	6
Figura 4 - Variação da pluviosidade média anual na bacia do Alto Grande. (A): P1 - Isoietas anuais no período 1980-92. P2 - Isoietas anuais no período 1993-2015. (B): Anomalia considerando a variação nos dois períodos (Marques <i>et al.</i> , 2020).	7
Figura 5 - Localização da Bacia Sanfranciscana no compartimento ocidental do Cráton São Francisco. Retirado de Barbosa <i>et al.</i> (2015).	8
Figura 6 - Contextualização tectônica da Bacia Sanfranciscana. I - Arco do Alto Paranaíba; II - Alto do Paracatu; III - Arco do São Francisco. SBU - Sub-bacia Urucuia; SBA - Sub-bacia Abaeté. Modificado de Campos e Dardenne (1997a).	9
Figura 7 - Metasiltitos e metargilitos do Grupo Bambuí na região de São Desidério-BA. Retirado de ANA (2017).	10
Figura 8 - Coluna estratigráfica da Bacia Sanfranciscana com destaque para o Grupo Urucuia (em vermelho). Modificado de Campos e Dardenne (1997a).	12

Figura 9 – Estratificação cruzada acanalada de grande porte na Formação Posse. Retirado de ANA (2017).	14
Figura 10 - Conglomerado da Formação Serra das Araras. Retirado de Gaspar (2006). 14	
Figura 11 - Modelo conceitual do processo de recarga no Sistema Aquífero Urucuia. Retirado de Eger <i>et al.</i> (2021).	16
Figura 12 - Subdivisões do SAU. Retirado de Gaspar & Campos (2007).	17
Figura 13 - Fluxograma do trabalho de modelagem numérica. Adaptado de Anderson e Woessner (1991).	27
Figura 14 - Malha do modelo numérico. Regiões em tons mais escuros representam áreas de malha refinada. Região em branco trata-se da área ativa do modelo.	28
Figura 15 - Condições de contorno do modelo de fluxo subterrâneo: A - Recharge; B - General Head Boundary (GHB); C - River; D – Wells.	30
Figura 16 - A - Mapa potenciométrico do modelo com carga hidráulica variando de cerca de 550 metros até cerca de 890 metros no extremo oeste. Observa-se que o nível potenciométrico possui semelhança com a superfície topográfica; B - Vetorização do fluxo para a sub-bacia do rio Grande; C – Vetorização do fluxo para a sub-bacia do rio São Desidério. Os vetores em branco indicam a descarga e os vetores vermelhos o fluxo em movimentação.	36
Figura 17 - Gráfico de calibração do modelo demonstrando uma modelagem satisfatória com valor de NRMS válido. Foram utilizados 29 pontos nas diferentes camadas do modelo para a calibração da carga, se obtendo um coeficiente de correlação de 0,958 e um erro médio residual normalizado de 9,3 %	37
Figura 18 - Rebaixamento para os cenários de simulação 1 e 2 na região central da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 4 metros no cenário 1, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 2 o rebaixamento chega a mais de 8 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.	39
Figura 19 - Rebaixamento para os cenários de simulação 3 e 4 na região central da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 4 metros no cenário 3, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 4 o rebaixamento chega a mais de 6 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.	40
Figura 20 – Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 1 e 2 na região central da área de estudo. É possível observar que as linhas de fluxo tendem a seguir o	

caminho natural do gradiente hidráulico, se direcionando para as células de condição River.	42
Figura 21 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 3 e 4 na região central da área de estudo. Pode-se observar que as linhas de fluxo tendem a seguir o caminho natural de montante a jusante, com captura restrita do fluxo pelas baterias de poços nesses cenários.	43
Figura 22 - Rebaixamento para os cenários de simulação 1 e 2 na região leste da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 16 metros no cenário 1, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 2 o rebaixamento chega a mais de 20 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3	46
Figura 23 - Rebaixamento para os cenários de simulação 3 e 4 na região leste da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 12 metros no cenário 3, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 4 o rebaixamento chega a mais de 14 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.	47
Figura 24 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 1 e 2 na região leste da área de estudo. Diferentemente dos cenários simulados para a região central, observa-se uma influência muito maior da bateria de poços nas linhas de fluxo, capturando parte do fluxo que se direciona de montante a jusante.	49
Figura 25 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 3 e 4 na região leste da área de estudo. Nesses dois últimos cenários é possível observar uma nítida influência da zona de influência dos poços capturando parte das linhas de fluxo.	50

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vi
<i>Abstract</i>	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	4
2.1 Localização	4
2.2 Aspectos Fisiográficos	5
2.3 Geologia Regional	8
2.3.1 Evolução Tectônica e Estratigrafia.....	10
2.4 Caracterização Hidrogeológica.....	16
3. OUTORGA SUBTERRÂNEA E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	20
4. METODOLOGIA.....	25
4.1 Modelo de Fluxo Subterrâneo.....	25
4.1.1 Dados de Entrada e Condições de Contorno	28
4.1.2 Calibração.....	31
4.1.3 Cenários Simulados	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Região Central	38
5.2 Região Leste	45
6. CONCLUSÕES	53
7. REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

O MATOPIBA (acrônimo para os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) corresponde a uma importante região geográfica que contribui com grande parte da produção brasileira de grãos e fibras. Dentro dessa região destaca-se o oeste da Bahia, que se tornou uma importante fronteira agrícola para o Brasil desde o fim da década de 1980 com o avanço de áreas de cultivo de monoculturas como soja, algodão, feijão, milho, café e frutas (Donagemma *et al.* 2016). Com isso foi possível notar uma mudança na paisagem dessa área, com a supressão da mata nativa, composta principalmente pela vegetação característica do Cerrado, dando lugar a áreas destinadas a agricultura. Essa expansão, somada às características climáticas do oeste da Bahia, com alternância bem definida de estações secas e úmidas, trouxe uma grande demanda, principalmente ligada à irrigação, pelos recursos hídricos que são abundantes nessa região, gerando um aumento dos requerimentos de outorga de direito de uso das águas superficiais e subterrâneas. Devido à baixa densidade de rios no oeste da Bahia (Gaspar, 2006) muitos já atingiram o limite máximo outorgável, direcionando nas últimas décadas a concessão de outorgas da região principalmente para a extração de águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU).

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) é um manancial subterrâneo regional de cerca de 126.468 km² de extensão que abrange os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí, Goiás, Minas Gerais e Bahia, este último abrigando a maior parte do SAU, com cerca de 82.000 km² de área efetiva (ANA, 2017). O SAU compreende as rochas do Grupo Urucuia, composto pelos arenitos flúvio-eólicos das formações Posse e Serra das Araras, da Bacia Sanfranciscana (Gaspar, 2006). Sabe-se que os rios em grande parte do domínio do Sistema Aquífero Urucuia no oeste da Bahia possuem caráter efluente, com contribuição média entre 89% e 95% da vazão de fluxo de base proveniente do aquífero (Gonçalves *et al.* 2017). Consequentemente, o aquífero é de grande importância para a manutenção das vazões da bacia do rio Tocantins, a oeste, e da bacia do rio São Francisco, a leste, contribuindo com 36% da vazão total anual do rio São Francisco (Vieira, 2021) que é o maior curso d'água exclusivamente brasileiro (CBHSF, 2015).

Todas as características citadas mostram que o SAU tem importância estratégica no desenvolvimento da região em que está inserido, o que demonstra que é necessária

uma boa gestão para evitar conflitos decorrentes de uma possível superexploração dos recursos hídricos, somado a um contexto de mudanças climáticas e do uso e cobertura do solo, afetando áreas de recarga do aquífero. As águas superficiais e subterrâneas fazem parte do mesmo ciclo hidrológico e, embora apresentem características diferentes, possuem interação direta no domínio do Sistema Aquífero Urucuia. Por isso é necessário que o gerenciamento dos recursos hídricos na região seja feito de forma integrada. Dessa forma, foram conduzidos uma série de estudos que culminaram na criação de instruções normativas: a Instrução Normativa N° 15 de 2010 do Instituto de Gestão das Águas e Clima da Bahia - INGÁ, que posteriormente foi atualizada gerando a Instrução Normativa N° 3, de 2022, do Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Bahia – INEMA. Essas INs estabelecem critérios específicos para a perfuração de poços no domínio do SAU na Bahia, levando em conta aspectos como vazão e tempo de bombeamento dos poços, distância entre poços e distância do poço para um corpo hídrico superficial. Embora a IN 3/2022 tenha sido um passo importante no sentido de um gerenciamento integrado dos recursos hídricos no oeste da Bahia, é importante também a utilização de ferramentas e metodologias que forneçam subsídios para a análise de técnicos no momento da avaliação de processos de outorga, permitindo a projeção de cenários futuros de exploração das águas e como o aquífero reagirá a esses cenários. Neste contexto, se insere o presente estudo.

1.1 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo a aplicação da modelagem numérica de fluxo, com a ferramenta numérica *Visual MODFLOW*, de modelagem matemática de aquíferos, simulando cenários de bombeamento ao longo de 10 anos na bacia do rio Grande, sub-bacia do Alto rio Grande - São Desidério, uma sub-bacia altamente manejada, localizada na região oeste da Bahia, aplicando os critérios estabelecidos na Instrução Normativa N° 3/2022 do INEMA-BA, a fim de avaliar o rebaixamento decorrente da extração das águas subterrâneas em regiões específicas do Sistema Aquífero Urucuia. Com isso procurou-se avaliar a utilização de um modelo de fluxo como ferramenta de suporte na análise de processos de outorga de direito de uso de águas subterrâneas no domínio do SAU, além de avaliar os critérios da IN 3, visando uma melhor gestão dos recursos hídricos da região.

A sub-bacia do Alto rio Grande - São Desidério foi escolhida pelo fato de se encontrar na bacia do rio Grande, região em que se pode observar a maior expansão agrícola no oeste da Bahia, com a instalação de diversos *pivots* de irrigação, sendo uma das bacias com maior demanda para o uso da água no domínio do Sistema Aquífero Urucuia. Além disso, foi observado nessa bacia o recuo de algumas nascentes de oeste para leste. Dessa forma, torna-se importante avaliar o comportamento do aquífero na bacia do rio Grande, sub-bacia do Alto rio Grande - São Desidério, com o intuito de entender melhor a dinâmica do meio físico nessa região, evitando possíveis conflitos pelo uso da água.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

Como dito anteriormente, a sub-bacia do Alto rio Grande - São Desidério, inserida na bacia do rio Grande, encontra-se na porção baiana do Sistema Aquífero Urucuia. A porção oeste/central da área de estudo (área do Alto rio Grande) está inteiramente contida no município de São Desidério, enquanto a parte leste (área do rio São Desidério) engloba trechos dos municípios de Angical, Catolândia, Tabocas do Brejo Velho, Baianópolis, Cristópolis e Barreiras (Figura 1).

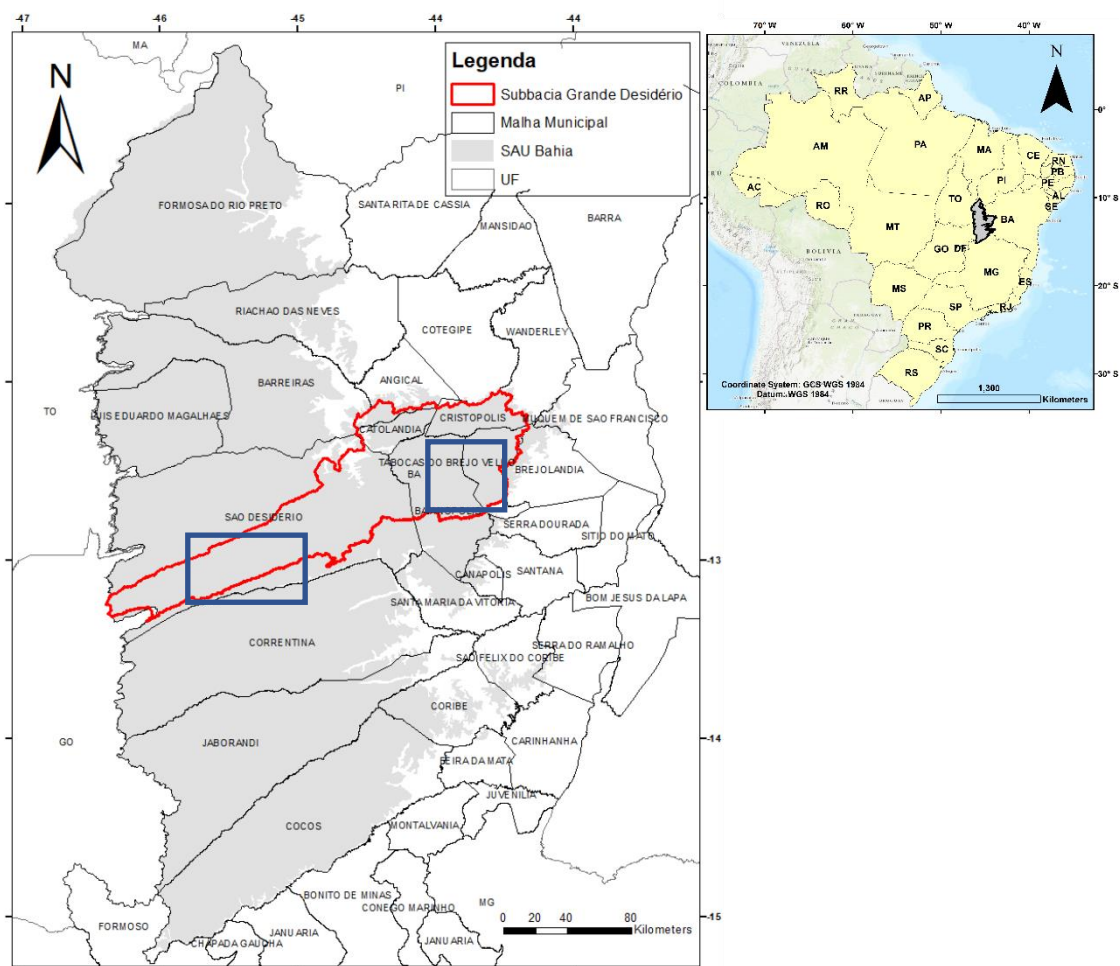


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. Os retângulos azuis representam a localização aproximada das áreas de detalhe da modelagem, Central e Leste.

2.2 Aspectos Fisiográficos

A área de estudo está inserida no bioma do Cerrado. Com isso, a cobertura da terra nessa região deveria estar preenchida pela vegetação característica desse bioma, que são as formações savânicas e campestres. Isso não ocorre devido a expansão do agronegócio no oeste da Bahia, principalmente a partir dos anos 1980, o que fez com que houvesse uma inversão no cenário do uso do solo nessa região, com a contínua supressão do cerrado dando lugar a áreas destinadas a agricultura de sequeiro e a agricultura irrigada (Figura 2). De acordo com Pimenta *et al.* (2021) entre 1990 e 2020 houve um aumento de 3,17 Mha em áreas destinadas à agricultura e 193.480 ha em áreas de agricultura irrigada.

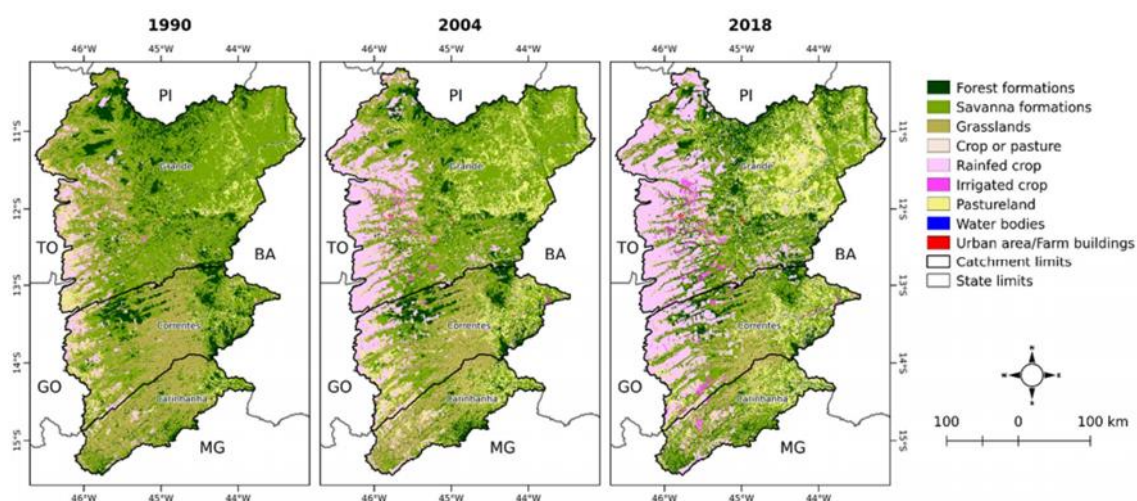


Figura 2 - Evolução do uso do solo no oeste da Bahia. Retirado de Mantovani *et al.* (2019).

Em relação à hidrografia, o SAU se localiza numa região de divisa hidrográfica regional, com o extremo oeste do aquífero drenando para a bacia hidrográfica do Tocantins, o extremo norte com nascentes drenando para a bacia hidrográfica do Parnaíba e a região central e leste contribuindo para o fluxo do médio São Francisco. O oeste da Bahia se divide em quatro bacias hidrográficas principais (Figura 3), são elas: bacia do Médio Grande, bacia do Alto Grande (onde se encontra a sub-bacia selecionada para este trabalho), bacia do Corrente e bacia do Carinhanha. O Sistema Aquífero Urucua exerce papel importante mantendo a perenidade dos rios da região no período de seca, devido à sua massiva contribuição através do fluxo de base. Os rios da região apresentam padrão de drenagem paralelo a subparalelo, condicionado

provavelmente pela reativação de fraturas existentes e bem representadas no Grupo Bambuí, com reflexos no Grupo Urucuia (Campos, 1996).

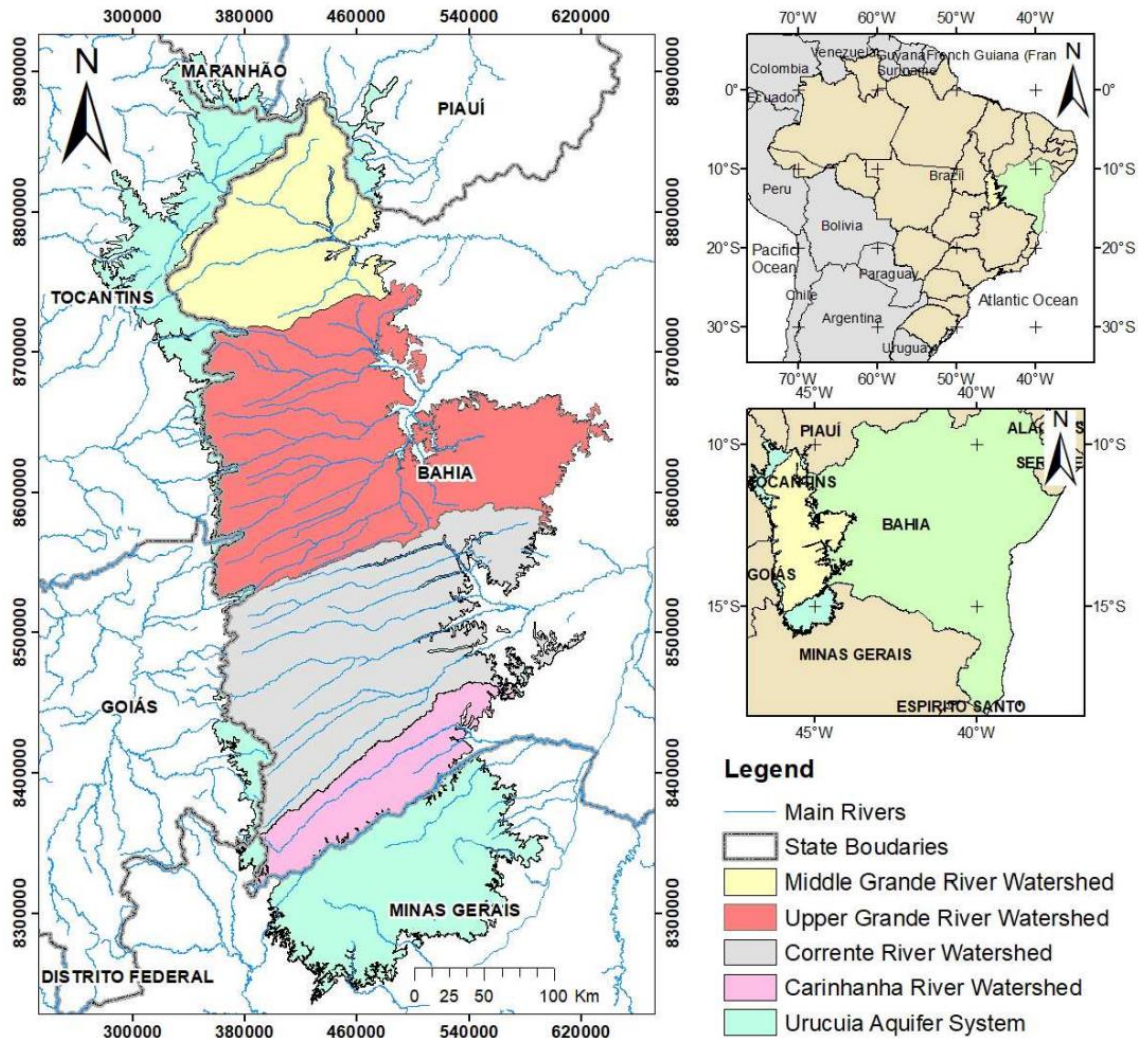


Figura 3 - Principais bacias hidrográficas do SAU na Bahia. De norte a sul: bacia do Médio Grande, bacia do Alto Grande, bacia do Corrente, bacia do Carinhanha. Retirado de Marques *et al.* (2020).

Historicamente, o regime de precipitação na região oeste da Bahia varia de 900 a 1450 mm ao ano, com aumento gradativo das isoietas de leste a oeste. Cabe ressaltar que houve uma diminuição de cerca de 12% no volume médio anual precipitado nas últimas décadas (Pousa *et al.* 2019). Pode-se observar essa variação histórica espacialmente distribuída na Figura 4, apresentada por Marques *et al.* (2020), com a bacia do Alto Grande, onde estão inseridas as sub-bacias do alto rio Grande e São Desidério, na bacia do rio Grande, em destaque. As estações secas e úmidas são bem definidas na região, com a precipitação variando tipicamente de 0 a 10 mm mês, nos

meses mais secos (junho, julho, agosto) a cerca de 150 a 200 mm mês, nos meses mais chuvosos (dezembro e janeiro).

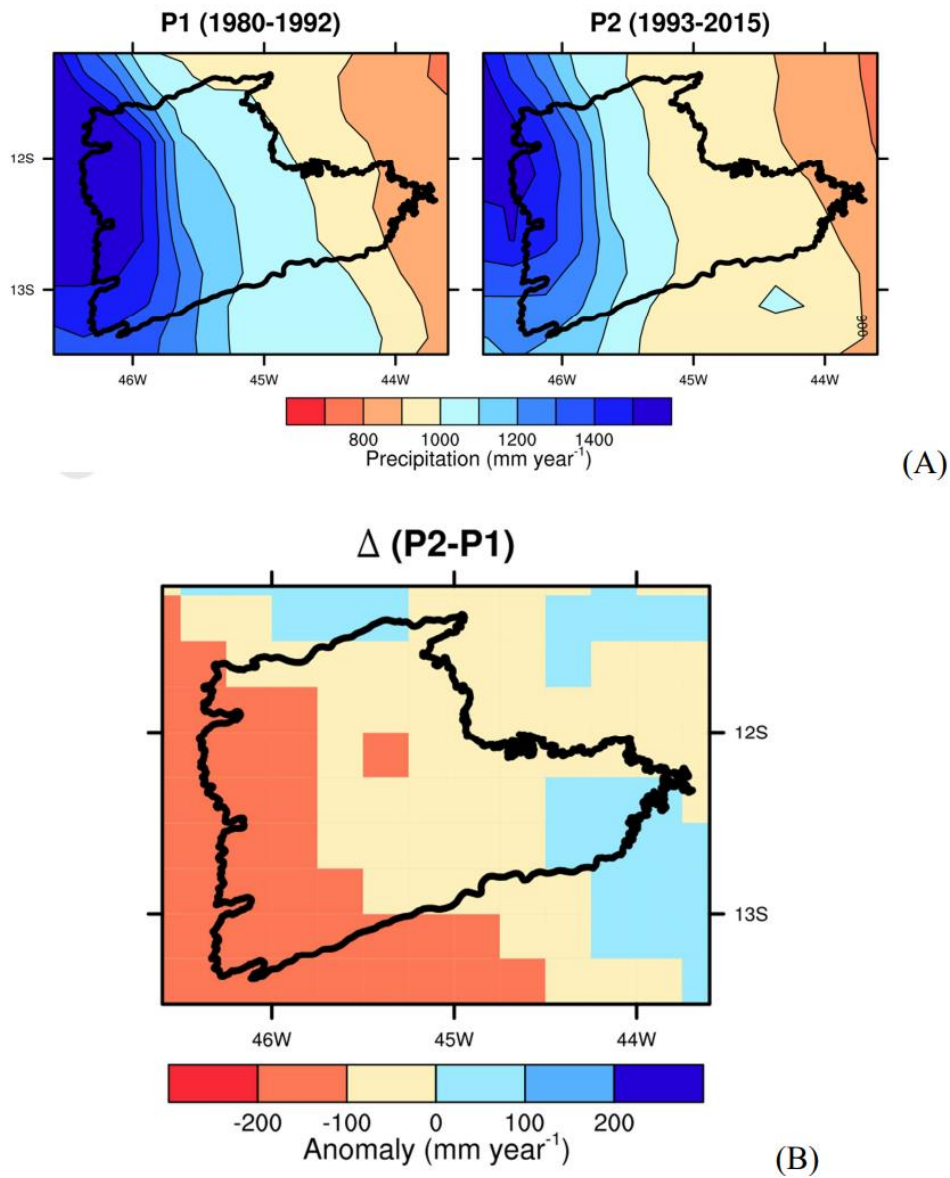


Figura 4 - Variação da pluviosidade média anual na bacia do Alto Grande. (A): P1 - Isoietas anuais no período 1980-92. P2 - Isoietas anuais no período 1993-2015. (B): Anomalia considerando a variação nos dois períodos (Marques *et al.*, 2020).

2.3 Geologia Regional

As rochas sedimentares da Bacia Sanfranciscana representam a cobertura fanerozoica do Cráton do São Francisco (Figura 5). A bacia possui cerca de 160.000 km² de área, com formato alongado e eixo aproximadamente Norte-Sul. É limitada a norte pelo Alto do São Francisco, que a separa da bacia do Parnaíba, e a sul pelo Alto do Paranaíba, que a separa da bacia do Paraná (Figura 6). É limitada a leste pela faixa Araçuaí/Espinhaço Setentrional e a oeste pela faixa Brasília. A bacia ainda é seccionada pelo Alto do Paracatu, sendo separada em duas sub-bacias com evoluções tectônicas distintas: a sub-bacia Urucuia, na região centro-norte e a sub-bacia Abaeté, na região sul (Campos & Dardenne, 1997a).

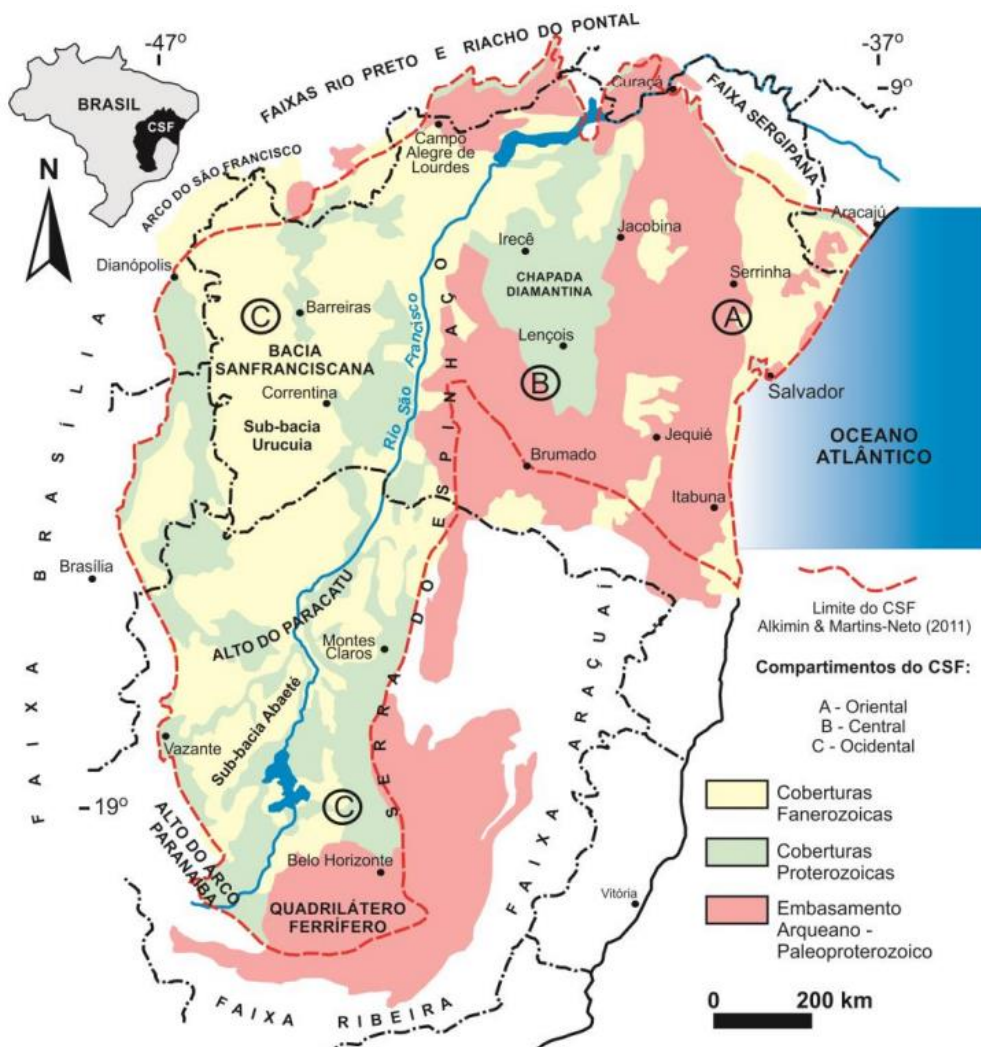


Figura 5 - Localização da Bacia Sanfranciscana no compartimento ocidental do Cráton São Francisco. Retirado de Barbosa *et al.* (2015).

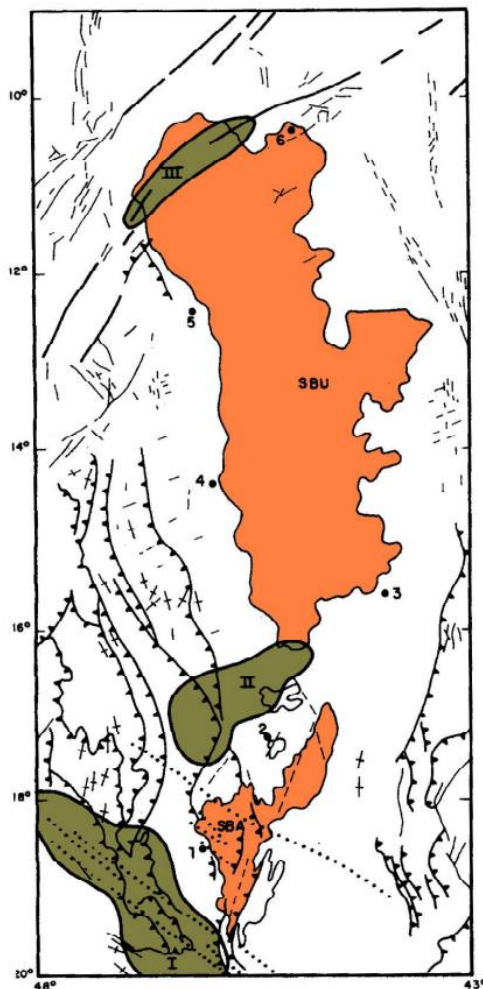


Figura 6 - Contextualização tectônica da Bacia Sanfranciscana. I - Arco do Alto Paranaíba; II - Alto do Paracatu; III - Arco do São Francisco. SBU - Sub-bacia Urucuia; SBA - Sub-bacia Abaeté. Modificado de Campos e Dardenne (1997a).

O embasamento da Bacia Sanfranciscana é formado em extensão predominantemente pelas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí (Figura 7), mas ocorrem também como embasamento dos sedimentos fanerozoicos no extremo sul rochas metamórficas paraderivadas de baixo grau dos Grupos Araxá e Canastra, sedimentos paleozoicos da Bacia do Parnaíba na região norte e rochas granito-gnáissicas arqueanas de extensão limitada nas regiões de Coribe-Correntina-BA, São Domingos-GO e Dianópolis-TO (Campos & Dardenne, 1997a).



Figura 7 - Metasilites e metargilitos do Grupo Bambuí na região de São Desidério-BA. Retirado de ANA (2017).

2.3.1 Evolução Tectônica e Estratigrafia

Campos & Dardenne (1997b) caracterizaram a Bacia Sanfranciscana como uma bacia do tipo *sag* com tectônica pouco pronunciada, onde a calha sedimentar foi gerada por subsidência decorrente de processos tafrogênicos incipientes, reequilíbrios isostáticos e processos de extensão e compressão intraplaca durante a glaciação neopaleozoica e a abertura do Atlântico Sul, sendo confirmada pela pequena espessura da bacia e ausência de falhas sindeposicionais. Os autores sintetizaram os processos de evolução da bacia em seis etapas:

1 – Estágio tectônico Paleozoico: calha sedimentar representada por um baixo relativo entre as cadeias de montanhas brasileiras representadas hoje pelas faixas Brasília, Araçuai e Espinhaço Setentrional. Nessa fase houve acumulação de sedimentos glaciogênicos Neopaleozoicos.

2 – Estágio tectônico Neopaleozoico-Eomesozoico: nesse estágio houve reequilíbrios isostáticos pós-glaciais, com retrabalhamento dos sedimentos depositados no Paleozoico. O soerguimento chegou a 200 metros na porção setentrional da bacia, diminuindo a sul.

3 – Estágio tectônico Barremiano-Aptiano: com a fase principal de estiramento crustal decorrente da ruptura do Gondwana, houve a reativação de estruturas brasileiras

do embasamento gerando extensão de maior magnitude na porção sul. Este estágio de evolução tectônica na porção sul da bacia caracteriza o primeiro registro de subsidência mecânica. Já na porção norte, ocorreu a reativação de estruturas locais, com tafrogênese incipiente, devido ao campo trativo de menor tensão.

4 - Estágio tectônico Cenomaniano: esse estágio marca a inversão do campo de tensão extensivo para compressivo na placa sulamericana. Com isso, houve subsidência na Bacia Sanfranciscana, decorrente da compressão da fase pós rifte (Chang *et al.* 1992), com soerguimento das regiões laterais da bacia e subsidência da região central, conforme modelo apresentado por Karner (1986) e Karner *et al.* (1983). Esse estágio marca o período de maior acumulação de sedimentos na bacia, relacionados à Sub-bacia Urucuia.

5 – Estágio tectônico Campaniano/Maastrichtiano: estágio registrado apenas na Sub-bacia Abaeté, com desenvolvimento a partir de falhas transformantes a partir da instalação de um campo de tensores extensivos NE–SW, com transtração gerando grábens. Houve magmatismo alcalino (principalmente na região do Alto Paranaíba) associado à despressurização gerada pelas falhas de grande profundidade.

6 – Estágio tectônico Cenozoico: esta fase é representada pelo padrão de drenagens paralelo a subparalelo, bem representado principalmente na Sub-bacia Urucuia. Ocorreu nesse período a reativação neotectônica de fraturas bem desenvolvida no embasamento.

A Bacia Sanfranciscana é composta por unidades neopaleozoicas, eocretáceas e neocretáceas, como se pode observar na carta estratigráfica (Figura 8) elaborada por Campos & Dardenne (1997a). Como o Sistema Aquífero Urucuia é restrito às rochas do grupo homônimo, neste trabalho os grupos e formações da bacia serão citados, mas apenas este último será descrito com mais detalhe, por se tratar da unidade de interesse. Destaca-se, ainda, que atualmente ainda há diferentes interpretações sobre o tipo de bacia que compõe o Sistema Aquífero Urucuia, se do tipo *sag* ou tipo *rifte*.

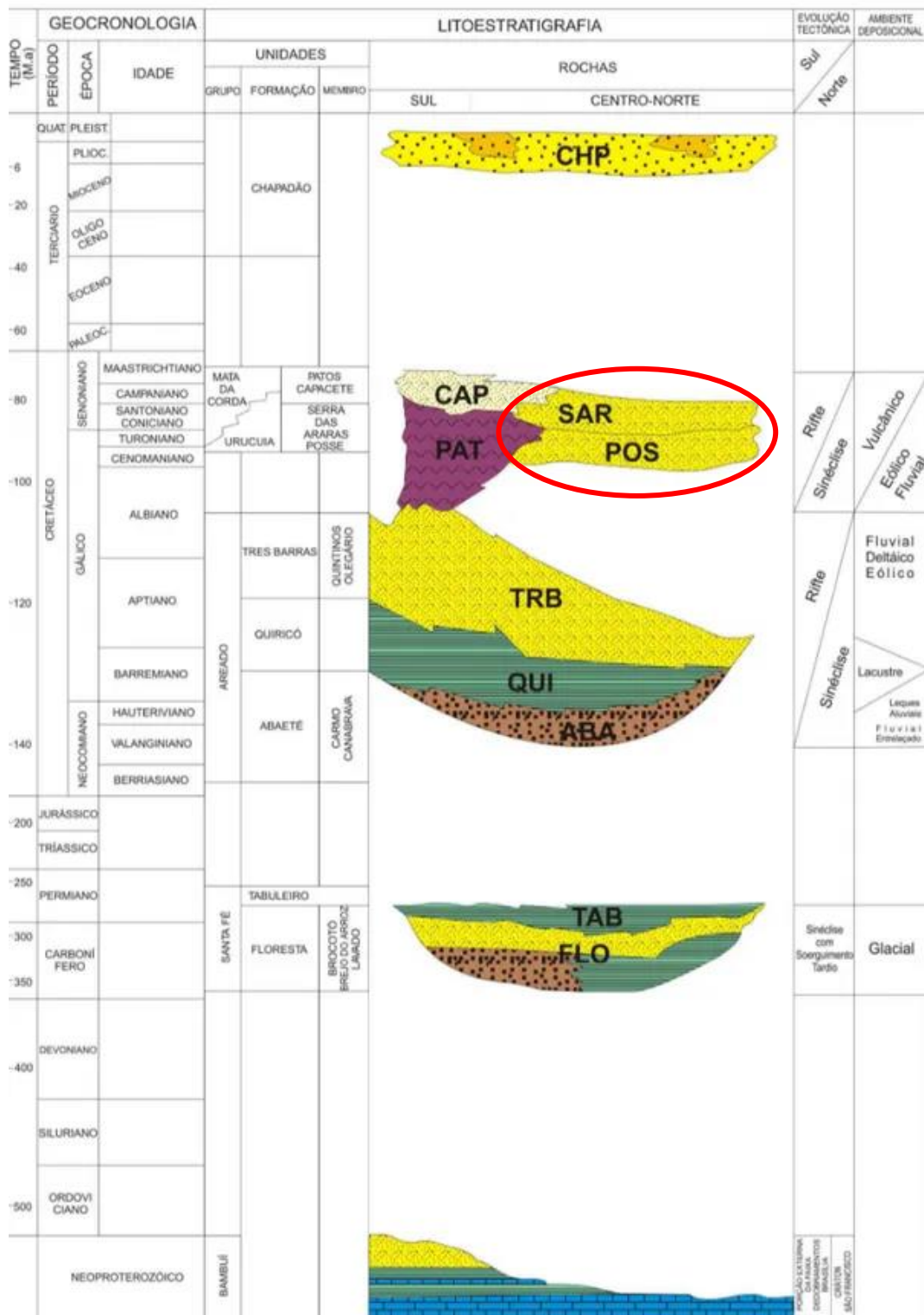


Figura 8 - Coluna estratigráfica da Bacia Sanfranciscana com destaque para o Grupo Urucua (em vermelho). Modificado de Campos e Dardenne (1997a).

A unidade basal é composta pelas rochas permocarboníferas do **Grupo Santa Fé**, representada pelas formações Floresta e Tabuleiro que marcam o evento de glaciação neopaleozoico no Gondwana.

No eocretáceo foram depositadas as rochas do **Grupo Areado**. Este grupo é composto pela Formação Abaeté (basal), depositada principalmente por leques aluviais; pela Formação Quiricó, depositada em ambiente lacustre; e pela Formação Três Barras, depositada em ambientes fluviais, fluviodeltaicos e eólicos.

Sobreposto ao Grupo Areado ocorrem as rochas do **Grupo Mata da Corda**, de idade Neocretácea. Esse grupo é constituído pelas formações Patos e Capacete, relacionadas ao magmatismo alcalino que ocorreu durante esse período. A primeira é composta por rochas vulcânicas alcalinas enquanto a segunda é constituída de rochas epiclásticas de fontes vulcânicas com contribuição de areias eólicas. Cabe ressaltar que esse grupo ocorre apenas na sub-bacia Abaeté.

Em seguida ocorrem as rochas do **Grupo Urucuia**, também de idade neocretácea. A parte basal do Grupo Urucuia é constituída pela **Formação Posse** (Figura 9), que pode ser subdividida em duas litofácies. A fácies 1 é interpretada como um sistema campos de dunas eólico, com quartzo-arenitos e arenitos feldspáticos, de granulometria fina a muito fina, alta maturidade textural e composicional. É possível observar em alguns níveis lentes conglomeráticas médias a finas. As rochas dessa fácies apresentam estruturas como estratificações cruzadas de grande porte e deslizamento de grãos na parte frontal das dunas. A fácies 2 da Formação Posse é interpretada como um sistema fluvial entrelaçado com influência eólica. É constituída por arenitos feldspáticos e quartzo-arenitos esbranquiçados e menos maduros que a fácies 1. Ocorrem estratificações cruzadas tabulares e tangenciais de pequeno porte.



Figura 9 – Estratificação cruzada acanalada de grande porte na Formação Posse. Retirado de ANA (2017).

A **Formação Serra das Araras** ocorre na parte superior do Grupo Urucuia. Essa formação é caracterizada como um ambiente fluvial entrelaçado sedimentado em lençóis de areia e cascalho, com grande variação de fluxo. Isso é justificado pela presença de argilitos, arenitos feldspáticos avermelhados e conglomerados intercalados. Os níveis conglomeráticos (Figura 10) são mais presentes na base da formação. É comum a ocorrência de estratos plano paralelos e, mais restritamente, estratificações cruzadas acanaladas de pequeno porte. É possível observar níveis de arenito silicificado tanto na Formação Posse como na Formação Serra das Araras (Bonfim & Gomes, 2004).



Figura 10 - Conglomerado da Formação Serra das Araras. Retirado de Gaspar (2006).

Por fim, recobrimo rochas que compõem a Bacia Sanfranciscana em áreas limitadas ocorrem os sedimentos cenozoicos da **Formação Chapadão**. Trata-se de

sedimentos arenosos inconsolidados que são depositados principalmente como aluvião nas drenagens que ocorrem na região.

2.4 Caracterização Hidrogeológica

Gaspar (2006) cunhou o termo Sistema Aquífero Urucuia para caracterizar a ocorrência de um conjunto de aquíferos numa mesma unidade geológica (nesse caso, o domínio do Grupo Urucuia), de abrangência regional. O SAU é caracterizado como um sistema do tipo granular em forma de tabuleiro composto predominantemente por quartzo-arenitos e arenitos feldspáticos, com alguns níveis conglomeráticos e silicificados. Possui alta capacidade de produção, com poços superando vazões de 500 m³/h (Schuster *et al.* 2002).

A recarga do aquífero ocorre através das chuvas de alta intensidade que ocorrem principalmente entre os meses de dezembro e fevereiro, gerando a infiltração da água precipitada no solo, percolando até atingir a zona saturada na forma de recarga (Figura 11). O oeste da Bahia possui características geomorfológicas com extensas regiões de chapadas nas quais ocorre a recarga e vales escavados em que ocorre a descarga para os rios que, como citado anteriormente, possuem contribuição que chega a até 95% da vazão anual do fluxo de base do aquífero (Gonçalves *et al.* 2017). Eger *et al.* (2021) utilizaram diferentes metodologias para a determinação da recarga no SAU durante o período de 2011 a 2019, obtendo uma média anual variando entre 192 e 216 mm para a bacia do rio Grande.

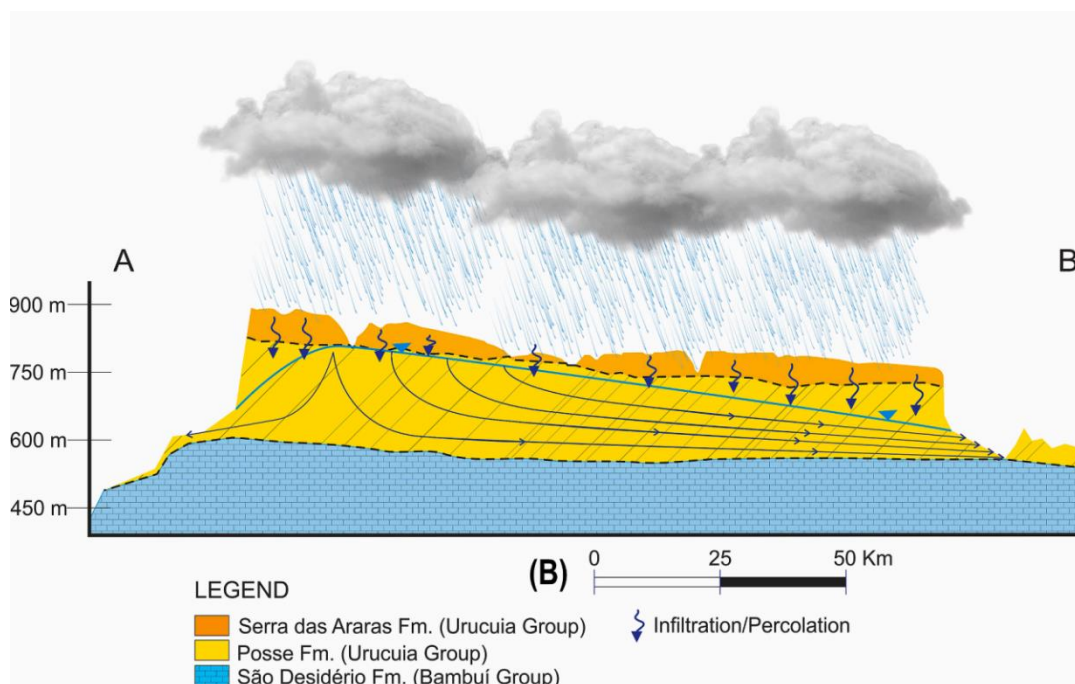


Figura 11 - Modelo conceitual do processo de recarga no Sistema Aquífero Urucuia. Retirado de Eger *et al.* (2021).

Em relação à superfície potenciométrica, normalmente esta possui configuração semelhante à superfície topográfica com o fluxo subterrâneo, ocorrendo em direção das regiões de mais altas altitudes para as mais baixas, ou seja, de oeste para leste (ANA, 2017).

O SAU pode ser subdividido em regiões com características de aquífero livre regional, aquífero suspenso local, aquífero semiconfinado ou confinado e aquífero livre profundo (Gaspar & Campos, 2007). Apresenta um eixo divisor do fluxo com direção N-S a oeste, próximo ao limite estadual da Bahia (Figura 12), drenando o fluxo subterrâneo em direção à bacia do rio Tocantins a oeste do eixo divisor, e para a bacia do rio São Francisco a leste do eixo. A explicação para os trechos com características de confinamento e semiconfinamento se dá pela existência de camadas silicificadas na Formação Serra das Araras.

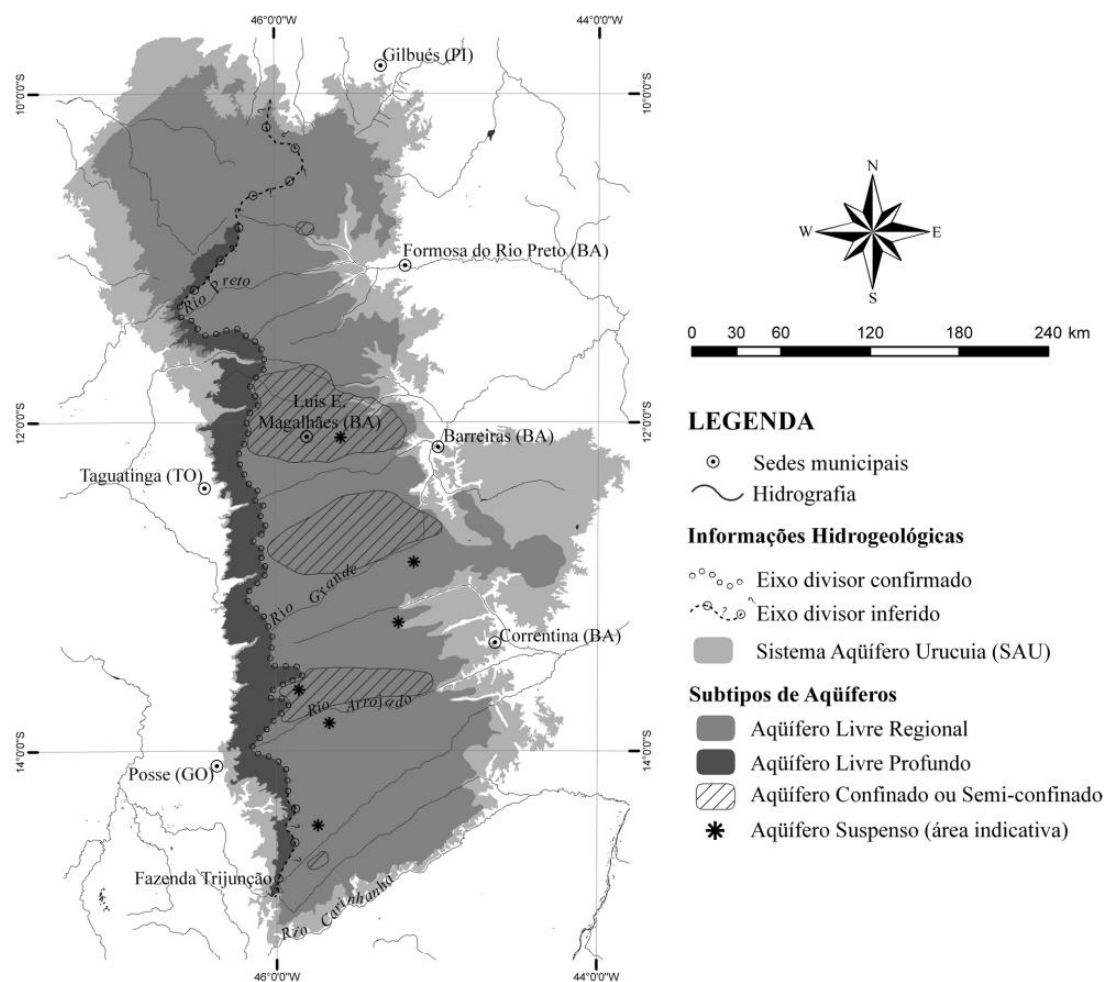


Figura 12 - Subdivisões do SAU. Retirado de Gaspar & Campos (2007).

Sobre as características hidrodinâmicas do SAU foram consultados diversos estudos (ANA, 2017; Barbosa, 2016; Gaspar, 2006; Mantovani *et al.* 2019) que, a partir de testes de bombeamento e compilação de informações em bancos públicos, confirmam o caráter semiconfinado e até confinado do aquífero em determinadas áreas, diferindo do *trend* geral de comportamento. De modo geral, a condutividade hidráulica varia entre 10^{-7} a 10^{-4} m/s em regiões com característica de aquífero livre e 10^{-6} a 10^{-4} m/s em regiões de aquífero confinado. Em relação à transmissividade 10^{-3} a 10^{-2} m²/s no aquífero confinado e 10^{-5} a 10^{-2} em regiões de aquífero freático. Foi obtido um coeficiente de armazenamento na ordem de 10^{-4} para o aquífero confinado e 10^{-1} para o aquífero livre (Gaspar & Campos, 2007).

A espessura do Aquífero Urucuia é objeto de constante debate e controvérsia, pelo fato de haver diversos estudos apresentando resultados distintos. Estudos no início deste século, como Gaspar (2006) e Amorim Jr e Lima (2007) encontraram espessuras variando de oeste a leste de 600 metros a 50 metros e 450 metros a pouco mais de 100 metros, respectivamente, utilizando técnicas geofísicas de sondagem eletromagnética no domínio do tempo (TDEM). Anteriormente, Tschiedel (2004) obteve resultados indicando maiores espessuras para o Grupo Urucuia, a partir de dois perfis geofísicos regionais no oeste da Bahia, chegando a espessuras de até 720 metros.

Estudos mais recentes apontam para perspectivas mais conservadoras em relação à espessura do SAU: Chang e Silva (2015) realizaram análises de sucessões sedimentares com base na identificação e correlação de fácies geofísicas, indicando que estudos anteriores foram induzidos ao erro pela incorporação à espessura do SAU das formações Motuca e Sambaíba da Bacia do Parnaíba, presentes no embasamento da Bacia Sanfranciscana. Com isso, o SAU teria uma espessura máxima na ordem de 350 metros. ANA (2017) utilizou dados de TDEM e sondagem elétrica vertical (SEV), resultando em espessuras variando na ordem de 50 metros a 350 metros, sendo as regiões mais espessas próximas ao município de Luís Eduardo Magalhães, na bacia do rio Grande. Ainda nesse mesmo estudo, é citado que foram perfurados poços estratigráficos pela CPRM e coletados dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), disponibilizado na 12^a Rodada de Licitações de Petróleo e Gás (2013), indicando espessuras de cerca de 600 metros para o Grupo Urucuia entre as cidades de Luís Eduardo Magalhães e Barreiras.

Em relação à disponibilidade hídrica, Mantovani *et al.* (2021) estimaram que a reserva explorável do Aquífero Urucua é da ordem de 3,72 km³/ano, com 11% em média já sendo utilizada através de poços, chegando a 18% da utilização na bacia do rio Grande. Enquanto o estudo da ANA (2017) obteve uma reserva explorável para o SAU na ordem de 4,84 km³/ano.

3. OUTORGA SUBTERRÂNEA E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Determinou-se no Brasil, a partir da Constituição de 1988, que as águas são um bem de domínio público. Dessa forma, trata-se de um bem não passível de apropriação, sendo seu uso sujeito à concessão de outorga pelo poder público. Por meio da Lei nº 9433/1997 foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos, na qual se determinaram diretrizes para uma melhor gestão das águas, com a finalidade de assegurar um uso racional e sustentável de forma benéfica à sociedade. Uma das diretrizes determinadas nessa lei foi que o uso de águas subterrâneas extraídas de aquíferos é sujeito à outorga. Determinou-se também que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da política nacional de recursos hídricos e que cabe aos estados a regularização e fiscalização do uso dos recursos hídricos. Em relação à definição do volume a ser considerado como limite do uso insignificante, essa é uma atribuição que cabe aos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBH) e que devem ser levados ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) e/ou ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

No estado da Bahia a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) foi instituída através da Lei nº 11612/2009, e o órgão público responsável pelo gerenciamento, regularização e fiscalização dos recursos hídricos é o Instituto de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos. O Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH) estabeleceu, através da Resolução nº 96/2014, que captações superficiais e subterrâneas de até 0,5 L/s (32,4 m³/dia, considerando o limite de extração de 18 h/dia) no estado da Bahia são considerados uso de pouca expressão, dessa forma sendo dispensados de outorga.

Um aspecto que se observa em todos os estados brasileiros é que se utiliza muito como referência no critério de concessão de outorgas a vazão mínima média ($Q_{7,10}$) e a vazão de permanência ($Q_{90\%}$ ou $Q_{95\%}$), e essas vazões são obtidas em períodos de estiagem, onde o fluxo de base dos aquíferos tem maior contribuição para a descarga dos rios. Dessa forma, pode-se concluir que ao utilizar esse critério, está se outorgando um grande volume de água subterrânea através da concessão de uma outorga superficial (Rodrigues, 2013).

Outro fator é que os órgãos gestores não apresentam metodologias integradas de análise levando em conta a conectividade das águas subterrâneas e superficiais, e que na

maioria dos estados brasileiros, para a análise do processo de outorga de captação subterrânea, não se utilizam ferramentas de suporte a decisão como métodos analíticos ou modelos numéricos de fluxo, sendo realizado o parecer técnico através apenas da análise de documentos e levando em conta aspectos da legislação local (Ramos, 2020).

Na Tabela 1 podem-se observar os volumes máximos para o uso insignificante subterrâneo em alguns estados brasileiros, de maneira a comparar com o estado da Bahia. Pode-se notar também a ausência de legislação ou instrução normativa nos estados brasileiros que determine um distanciamento mínimo entre poços. Em alguns existe a recomendação da realização de testes de interferência para casos de grande proximidade entre poços.

Tabela 1 – Legislação em relação ao limite de uso insignificante e distância mínima entre poços em algumas UFs.

UF	Limite de Uso Insignificante Subterrâneo	Distância Mínima entre Poços	Fonte
BA	32,4 m ³ /dia	600 a 2500 m ^(*)	CONERH n° 96/2014 e Norma INEMA 3/2022
MG	10 m ³ /dia	Não determinado	Norma CERH-MG n° 9/2004
MT	10 m ³ /dia	Não determinado	RESOLUÇÃO CEHIDRO n° 27 /2009
PE	5 m ³ /dia e prof. < 20m	Não determinado	Decreto 20423/1998
RJ	5 m ³ /dia	Não determinado	NOP INEA 38
SP	15 m ³ /dia	Não determinado	Portaria DAEE 1631

(*) Válido para o domínio do SAU.

De forma a criar uma gestão integrada das águas do SAU foi criada a Instrução Normativa n° 15 em 2010 pelo Instituto de Gestão de Águas e Clima (INGÁ). Posteriormente, em 2022, houve uma atualização da norma, tendo sido definida a Instrução Normativa n° 3 pelo INEMA. A IN 3 dispõe sobre procedimentos administrativos e critérios técnicos de tamponamento de poços, monitoramento e outorga para fins de exploração além da autorização para perfuração de poços no domínio do Sistema Aquífero Urucuia no estado da Bahia. Leva em conta aspectos

como a vazão de bombeamento, distância entre poços e distância do poço para um corpo hídrico superficial, como se pode ver a seguir.

Art. 12º. Para efeito desta Instrução Normativa ficam definidas as seguintes distâncias mínimas,

entre poços e entre estes e os cursos d'água como manifestação prévia da expectativa de vazão, respeitando os critérios:

§1º - Entre poços tubulares de usuários de recursos hídricos:

I - distância inferior a 500 metros: expectativa de dispensa de outorga, somente para fins de consumo humano e dessedentação animal;

II - distância de 500 até 1000 metros: expectativa de captação de até 1.800 m³/dia;

III - distância acima de 1000 até 1500 metros: expectativa de captação de até 3.600 m³/dia;

IV - distância acima 1500 até 2000 metros: expectativa de captação de até 5.400 m³/dia;

V - distância acima 2000 até 2500 metros: expectativa de captação de até 7.200 m³/dia;

VI - distância acima de 2500 metros: expectativa de captação de até 9.000 m³/dia.

§2º - Para um conjunto de poços situados em um perímetro que caracterize um único empreendimento e usuário de recursos hídricos, será adotada a regra do §1º para determinar o número

máximo de poços no perímetro. A locação dos poços ficará a critério do usuário de recursos hídricos obedecendo à expectativa de captação máxima, entretanto pode se adotar distanciamentos diferenciados de acordo com projeto apresentado.

§3º - Nos casos em que se adotar distanciamentos diferenciados daqueles definidos no §1º e forem identificadas possíveis interferências nos valores totais dos volumes captados entre poços do mesmo empreendimento, a responsabilidade será inteiramente do empreendedor.

§4º - Os distanciamentos diferenciados daqueles definidos no §1º não serão permitidos se forem identificados possíveis interferências nos valores totais dos volumes captados entre poços de propriedades vizinhas de diferentes proprietários.

§5º - Entre poços tubulares e rios perenes ou intermitentes:

I - distância inferior a 500 metros: expectativa de dispensa de outorga, somente para fins de consumo humano e dessedentação animal;

II - distância de 500 até 1.000 metros: expectativa de captação de até 1.800 m³/;

III - distância acima 1000 até 1500 metros: expectativa de captação de até 3.600 m³/dia;

IV - distância acima 1500 até 2000 metros: expectativa de captação de até 5.400 m³/dia;

V - distância acima 2000 até 2500 metros: expectativa de captação de até 7.200 m³/dia;

IV - distância acima de 2500 metros: expectativa de captação de até 9.000 m³/dia.

§6º - A profundidade será definida com base em estudos de possível interferência do poço no manancial mais próximo, apresentado pelo usuário, visando à segurança hídrica da bacia.

(...)

Art. 20º. A captação máxima a ser autorizada em poços perfurados no SAU é de até 9.000 m³/dia.

Algumas limitações que eram observadas na IN 15 foram atenuados com os itens §3º e §4º além dos artigos presentes no capítulo V dessa norma, como: a) a falta de avaliação da influência do bombeamento das águas subterrâneas nos rios, alegação de alguns usuários de que a interferência entre os poços não ocorre e de que a depleção dos rios não foi interrompida (Ramos, 2020); b) que o critério de distância entre poços permite uma enorme oscilação entre o limite máximo outorgável no aquífero, de quase 300 vezes entre volumes outorgáveis (Rodrigues, 2013), já que pode chegar a mais de 2 km e acabava impedindo a perfuração de mais de um poço em certos terrenos e fazendas, limitando o funcionamento de determinados empreendimentos que demandem o uso da água subterrânea.

Ainda assim, ou até por conta dessas flexibilizações, são necessárias melhorias contínuas e implementação de ferramentas de suporte para uma melhor análise e tomada de decisão para concessão de outorgas no SAU, a fim de garantir a sustentabilidade a longo prazo das águas subterrâneas e superficiais e uma melhor gestão dos recursos hídricos no oeste da Bahia evitando conflitos pelo uso da água e promovendo melhorias

contínuas na legislação local. Os modelos numéricos de fluxo são ótimas ferramentas para uma análise integrada, de forma a determinar os impactos da extração das águas subterrâneas nos aquíferos e nos rios a longo prazo. Assim, utilizou-se esse método para analisar esses impactos na sub-bacia do alto rio Grande-São Desidério, respeitando os critérios da IN 3 e projetando cenários alternativos.

4. METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho foi feita uma revisão bibliográfica a fim de coletar dados secundários para a aplicação de entrada no modelo e obter informações de estudos recentes. Além disso, a legislação e diretrizes atuais no oeste da Bahia foram consultadas com o intuito de contribuir na discussão desse trabalho. Para a elaboração do modelo de fluxo subterrâneo foi utilizado o *software Visual MODFLOW Classic 4.6*, que é uma interface gráfica do código *MODFLOW* (McDonald e Harbaugh, 2003) desenvolvido pela empresa *Waterloo Hydrogeologic*. Por fim, foram determinados oito cenários em dois locais distintos da área do estudo para simulação no modelo de fluxo, com base nas diretrizes que constam na Instrução Normativa INEMA n° 3, de forma a avaliar os efeitos do bombeamento no aquífero num período de 10 anos. Com isso, espera-se contribuir com sugestões de melhorias futuras na legislação local e determinar a eficiência de um modelo numérico de fluxo como ferramenta de suporte para a análise e decisão nos processos relacionados ao uso da água subterrânea no oeste da Bahia.

4.1 Modelo de Fluxo Subterrâneo

O modelo numérico de fluxo subterrâneo é uma representação simplificada de condições hidrogeológicas complexas em subsuperfície, que busca simular a distribuição espacial e temporal da carga hidráulica de certa área através de equações matemáticas que aproximam o modelo dos processos físicos que ocorrem na natureza (Anderson *et al.* 2015). Todos os modelos de fluxo subterrâneos apresentam uma equação geral de fluxo baseada na lei de Darcy e na lei de conservação de massas, sendo uma equação diferencial parcial que demonstra a trajetória do fluxo subterrâneo em um meio poroso saturado em três dimensões, demonstrada na Equação 1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que: K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} são os tensores de condutividade hidráulica (L/T) ao longo dos eixos x, y e z, respectivamente; h é a carga hidráulica (L); W é o parâmetro que representa o fluxo volumétrico por unidade de volume (1/T) de fontes (valor positivo) ou sumidouros (valor negativo) no sistema; S_s é o armazenamento específico (1/L); e t é o tempo (T).

As simulações podem ocorrer em estado permanente ou transiente. Nos casos em que o modelo é simulado no estado permanente ou estacionário a equação de fluxo (Equação 1) tem $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, ou seja, a carga hidráulica e fluxo são constantes durante o tempo. Já nos casos em que o modelo é simulado no estado transiente, ocorre uma variação da carga hidráulica ao longo do tempo através de mudanças nas condições de contorno, como a taxa de bombeamento e a recarga.

Tipicamente, modelos numéricos de fluxo são baseados no método de diferenças finitas ou de elementos finitos. Ambos os métodos vêm sendo utilizados para desenvolver pacotes de *software* conhecidos capazes de simular modelos em condições de fluxo permanente ou transiente (Guira, 2018). O método de elementos finitos trabalha com discretização numa malha de elementos poligonais, mais comumente com base triangular. Programas amplamente aceitos como o *FEFLOW* (Diersch, 2005) utilizam a malha de elementos finitos. Já o método de diferenças finitas utiliza uma malha de discretização retangular, resolvendo a equação de fluxo a partir de dados de entrada e condições de contorno. O *USGS MODFLOW* é o *software* mais popular na modelagem subterrânea e utiliza do método de diferenças finitas. No presente trabalho o código *MODFLOW* foi utilizado a partir da interface gráfica (GUI) *Visual Modflow Classic* 4.6, desenvolvido pela empresa *Waterloo Hydrogeologic*, que é a versão comercial mais amplamente utilizada em todo o mundo.

Na etapa de pós processamento do *MODFLOW* existem alguns pacotes de ferramentas que podem ser utilizados para a realização de análises mais completas dos resultados da modelagem. O *MODPATH* (Pollock, 1994; 2012), é um pacote que promove o rastreamento de partículas do modelo em pontos específicos determinados pelo modelador, onde é possível observar a trajetória das linhas de fluxo até atingir uma condição de contorno. O *ZONEBUDGET* (Harbaugh, 1990), é um pacote utilizado na computação do balanço de massas em zonas específicas da área modelada, determinadas pelo modelador, indicando as entradas e saídas de água entre cada condição de contorno e subzona.

O fluxograma do trabalho deu-se com a elaboração de um modelo conceitual a partir da coleta de dados secundários; definição da malha do modelo e condições de contorno; simulação em estado estacionário e calibração manual do modelo comparando os dados observados com os simulados e, posteriormente, com o modelo estabelecido; refinamento da malha nas regiões de interesse e simulação dos cenários desejados. Pode-se observar o protocolo de modelagem na Figura 13.

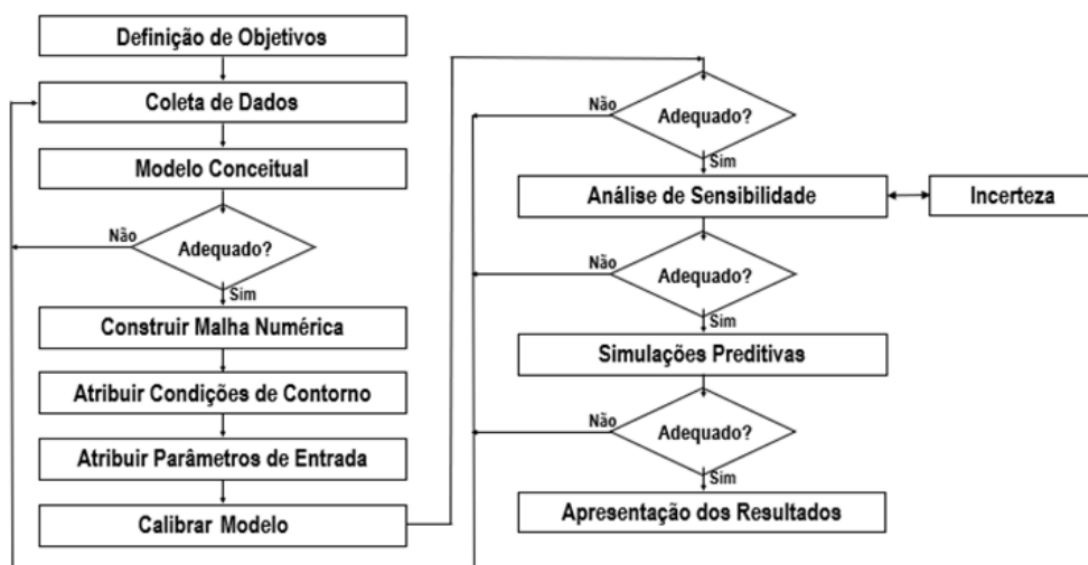


Figura 13 - Fluxograma do trabalho de modelagem numérica. Adaptado de Anderson e Woessner (1991).

4.1.1 Dados de Entrada e Condições de Contorno

Para o modelo da bacia dos rios Grande e São Desidério foi definida uma separação deste em 3 camadas, a fim de representar as fácies 1 e 2 da Formação Posse nas camadas inferiores e a Formação Serra das Araras na camada superior. A área modelada tem aproximadamente 12.089 km², ou seja, trata-se de uma bacia de grandes dimensões. Com isso, regionalmente foi determinada uma malha de diferenças finitas com células de dimensões aproximadas de 1578 m, em X, e 1307 m, em Y, e nas regiões de interesse, designadas como sub-área do Alto Grande e sub-área de São Desidério, na quais foram inseridos os poços para simulação dos cenários de bombeamento, houve um refinamento maior, com células de dimensões aproximadas de 337 m, em X, e 257 m, em Y, como se pode ver na Figura 14.

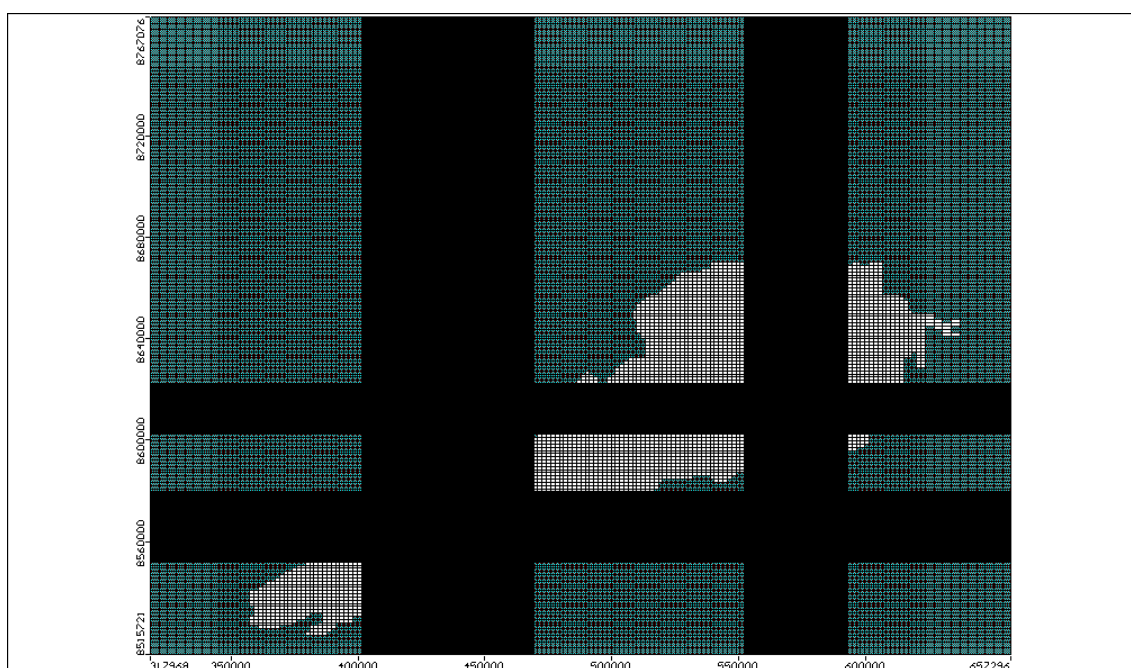


Figura 14 - Malha do modelo numérico. Regiões em tons mais escuros representam áreas de malha refinada. Região em branco trata-se da área ativa do modelo.

As propriedades do modelo conceitual foram determinadas a partir da coleta de dados de parâmetros hidráulicos de diversos estudos realizados no domínio do SAU (ANA, 2017; Barbosa, 2016; Gaspar, 2006). As condutividades hidráulicas do modelo foram definidas a partir da interpolação dos dados obtidos na pesquisa bibliográfica, e variaram na ordem de 10^{-4} m/s a 10^{-7} m/s na camada 1, 10^{-4} m/s a 10^{-5} m/s na camada 2 e 10^{-3} m/s a 10^{-4} m/s na camada 3. A superfície topográfica do modelo foi definida com o modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA. Já a espessura do SAU foi representada de forma conservadora, sendo feita uma interpolação das profundidades finais dos poços com dados disponíveis no SIAGAS/CPRM (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), uma vez que existem muitas divergências em relação à espessura do aquífero, conforme comentado anteriormente.

As condições de contorno são características físicas e hidráulicas incorporadas ao modelo a fim de resolver a equação de fluxo (Equação 1). No presente trabalho assumiu-se que os limites leste e oeste (limites geomorfológicos) do modelo, assim como a base do aquífero (contato com o embasamento) são regiões de fluxo nulo (*no flow*). As demais condições de contorno definidas para o modelo numérico da bacia dos rios Grande São Desidério são as apresentadas na Figura 15 e discriminadas nos parágrafos seguintes.

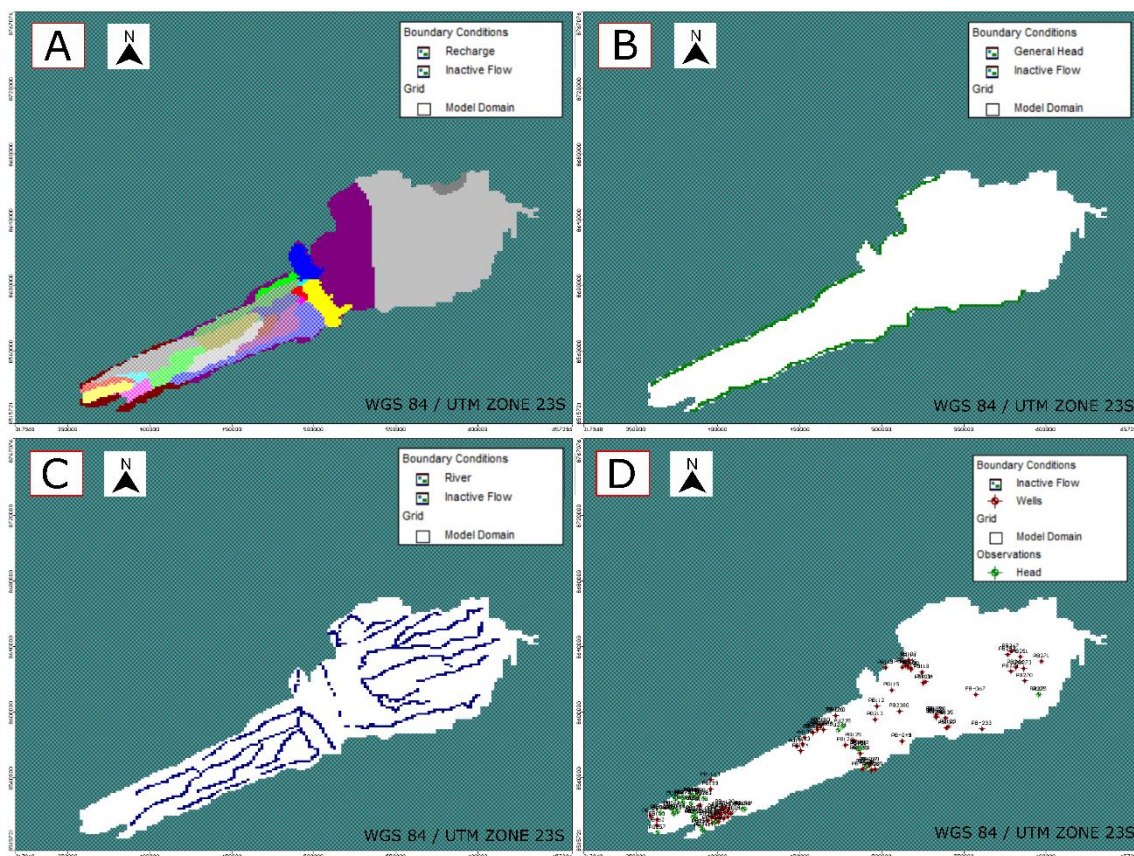


Figura 15 - Condições de contorno do modelo de fluxo subterrâneo: A - Recharge; B - General Head Boundary (GHB); C - River; D - Wells.

- Recharge:** Essa condição de contorno representa a taxa de recarga média para o aquífero, ou seja, a porcentagem do volume precipitado que atinge a zona saturada do SAU (Figura 15A). A recarga para a região oeste desse modelo foi definida a partir de uma modelagem hidrológica com o programa SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), no qual são definidas unidades de resposta hidrológica (HRUs) a partir da sobreposição de dados de uso do solo, tipo de solo e declividade na área de interesse (Neistch *et al*, 2011; Arnold *et al*, 2012). A aplicação dessa metodologia pode ser consultada de forma mais detalhada em Eger *et al*. (2021). Após a simulação do modelo é necessária a calibração do mesmo a partir de dados de estações fluviométricas. Essa modelagem foi realizada apenas na sub-bacia do rio Grande, pela escassez de série de dados de vazão contínuos na região leste da área de estudo (sub-bacia do rio São Desidério). Com isso, para a região leste do modelo, a taxa de recarga foi definida a partir de uma fração das faixas de isoietas anuais médias para a região. E essa taxa foi definida com base em estudos anteriores na bacia do Alto Grande (Pimentel *et al*. 2000; Gaspar, 2006; ANA, 2017).

- **General Head Boundary (GHB):** Essa condição de contorno foi aplicada nas fronteiras norte e sul do modelo, levando em conta a continuidade do SAU nessas duas direções. O GHB é determinado a partir da aplicação de um gradiente hidráulico calculado pela diferença entre uma carga hidráulica especificada fora do limite modelado e uma carga hidráulica calculada pelo modelo no limite dele. Essa é uma condição de fluxo dependente da carga hidráulica (Condição de Cauchy). Pode-se observar em verde o GHB aplicado ao modelo na Figura 15B.
- **River:** Essa condição de contorno foi aplicada de forma a representar a rede de drenagem superficial na região (Figura 15C). Os rios podem funcionar como zonas de descarga (rio efluente) ou zonas de contribuição para as águas subterrâneas (rio influente) a depender do gradiente hidráulico entre o sistema de águas subterrâneas e o corpo hídrico superficial. Para a aplicação da condição *River* são necessárias informações como a elevação do corpo hídrico, a extensão da camada do leito do rio e a condutância dessa camada (parâmetro que pode ser calculado por uma fórmula padrão no *MODFLOW*).
- **Wells:** Essa condição de contorno foi usada com a finalidade de representar os poços de bombeamento outorgados que são usados para irrigação agrícola dentro do domínio do modelo. É possível ver a distribuição dos poços de bombeamento (em vermelho) e dos poços de observação (utilizados na calibração do modelo, em verde) na Figura 15D. As informações dos poços representados no modelo foram coletadas no SIAGAS. Cabe ressaltar que só foram incluídos no modelo poços sem erros ou lacunas nos dados que interessam para esse trabalho, totalizando 105 poços de bombeamento e 28 poços de observação.

4.1.2 Calibração

A calibração do modelo é realizada a partir da comparação das cargas hidráulicas calculadas e observadas nos poços após a simulação. A fim de se chegar a uma melhor correspondência entre as condições numéricas simuladas e as características observadas na realidade são realizados ajustes manuais nos dados de entrada. O parâmetro de calibração que foi usado como base para determinar se o modelo é válido foi o erro médio residual normalizado (NRMS), descrito na Equação 2.

$$NRMS = \frac{RMS}{(Xobs)max - (Xobs)min} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2}$$

Sendo: n o número de pontos a serem calibrados; R a diferença entre o valor calculado e o observado; $(Xobs)max$ o valor máximo de carga hidráulica observado; $(Xobs)min$ o valor mínimo de carga hidráulica observado.

4.1.3 Cenários Simulados

Com o intuito de avaliar as condições impostas na IN 3 foram realizadas simulações com baterias de poços em cenários fictícios. Foram definidas duas áreas na bacia dos rios Alto Grande e São Desidério dentro do recorte principal da área de estudo, nas quais foram inseridas as baterias de poços: a área central e a área leste. A primeira foi escolhida por ser uma área da bacia onde a expansão agrícola vem sendo acentuada, além de possuir grande espessura saturada. A segunda foi escolhida por ser uma região mais seca, além do SAU possuir menor espessura ali, podendo ser mais sensível aos efeitos do bombeamento a longo prazo, com o surgimento de empreendimentos que podem trazer uma maior demanda pelas águas subterrâneas, devido aos menores índices pluviométricos.

Os poços artificiais foram definidos com 140 m de seção filtrante, começando em 120 m de profundidade até 260 m, que é a profundidade final de todos os poços. Caso a espessura do aquífero fosse menor que a profundidade pré-determinada dos poços a seção filtrante seria de 120 m até o final do poço, coincidindo com a base do aquífero naquele ponto. O período de simulação para todos os cenários foi de 10 anos, uma margem segura de avaliação dos efeitos do bombeamento, considerando a validade de quatro anos para a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos Subterrâneos no oeste da Bahia (Portaria INEMA Nº 11.292/2016).

Para a região central do modelo foram realizadas simulações com quatro cenários, sendo dois cenários respeitando as distâncias definidas na IN 3 (cenários 1 e 3) e outros dois simulando situações de maior estresse hídrico, com distâncias menores que as permitidas na norma (cenários 2 e 4). Foi definida uma bateria de 30 poços para todos os quatro cenários, com 18 h de bombeamento por dia (máximo permitido na região), sendo 500 m³/h nos cenários 1 e 2, totalizando 9000 m³/dia, e 300 m³/h nos cenários 3 e 4, totalizando 5400 m³/dia. Na Tabela 2 pode-se observar os cenários hipotéticos definidos para a região central da área de estudo.

Tabela 2 – Cenários hipotéticos para a região central da área de estudo.

	Quantidade de poços	Distância entre poços/rio	Bombeamento diário	Período total de simulação
Cenário 1	30	2500 m	9000 m ³	10 anos
Cenário 2	30	1500 m	9000 m ³	10 anos
Cenário 3	30	1500 m	5400 m ³	10 anos
Cenário 4	30	1000 m	5400 m ³	10 anos

Da mesma forma, na região leste do modelo foram realizadas simulações com quatro cenários, sendo dois cenários respeitando as distâncias definidas na IN 3 (cenários 1 e 3) e outros dois simulando situações de maior stress hídrico, com distâncias menores que as permitidas na norma (cenários 2 e 4). Foi definida uma bateria de 20 poços, sendo 4 linhas e 5 colunas (4x5), para todos os quatro cenários, com 18 h de bombeamento por dia, sendo 300 m³/h nos cenários 1 e 2, totalizando 5400 m³/dia, e 200 m³/h nos cenários 3 e 4, totalizando 3600 m³/dia. O menor número de poços e vazões bombeadas para essa região se justifica pelo menor potencial hídrico dessa área. Na Tabela 3 pode-se observar os cenários hipotéticos definidos para a região leste da área de estudo.

Tabela 3 – Cenários hipotéticos para a região leste da área de estudo.

	Quantidade de poços	Distância entre poços/rio	Bombeamento diário	Período total de simulação
Cenário 1	20 (4x5)	1500 m	5400 m ³	10 anos
Cenário 2	20 (4x5)	1000 m	5400 m ³	10 anos
Cenário 3	20 (4x5)	1000 m	3600 m ³	10 anos
Cenário 4	20 (4x5)	500 m	3600 m ³	10 anos

Para as simulações dos cenários hipotéticos, assumiu-se que o nível potenciométrico obtido como resultado da simulação inicial em estado estacionário seria a carga inicial dos modelos fictícios em estado transiente. Por fim, avaliou-se o raio do rebaixamento das baterias de poços e adicionalmente foram utilizadas as ferramentas *MODPATH*, que mostra a trajetória do fluxo nas regiões de interesse, podendo determinar a influência do bombeamento de água através dos poços nas linhas de fluxo, e a ferramenta *ZONEBUDGET*, que calcula o balanço de massas, indicando as proporções de volume de água retirados pelos poços em relação aos rios e à recarga. Com a aplicação dessas ferramentas em conjunto, pôde-se avaliar os impactos do bombeamento num período de 10 anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foi realizada uma simulação com o cenário de bombeamento atual na bacia do rio Grande, sub-bacias do alto rio Grande e São Desidério a fim de se estabelecer um modelo base devidamente calibrado e válido para, em sequência, realizar a inserção das baterias de poços e cenários hipotéticos de simulação. O nível potenciométrico obtido como resultado na área de estudo variou entre 550 m e 893 m aproximadamente, coincidindo com a variação topográfica da região (Figura 16a).

Empregou-se a ferramenta *ZONEBUDGET* para a visualização do balanço hídrico na sub-bacia, e os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Balanço Hídrico para o modelo inicial.

	Entrada (hm³/dia)	Saída (hm³/dia)
<i>Wells</i>	-	0,197
<i>River</i>	0,659	15,572
<i>GHB</i>	7,511	0,080
<i>Recharge</i>	7,608	-
Total	15,778	15,778

Constatou-se que o bombeamento dos poços no cenário atual equivale a apenas 2,5% da recarga e que a maior parte da água que sai do aquífero se destina à alimentação da descarga dos rios.

Esse resultado, juntamente com o mapa de fluxo vetorizado do modelo (Figura 16b e 16c), demonstra o caráter predominantemente efluente dos rios na região, corroborando com os estudos utilizados na revisão bibliográfica.

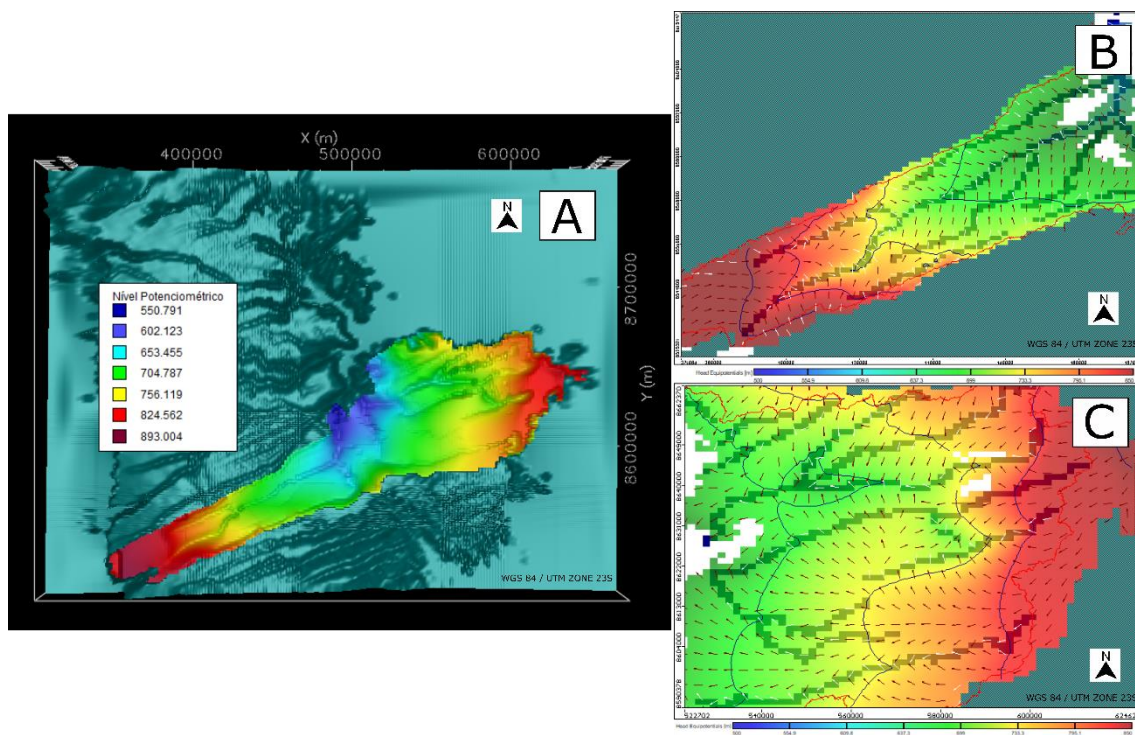


Figura 16 - A - Mapa potenciométrico do modelo com carga hidráulica variando de cerca de 550 metros até cerca de 890 metros no extremo oeste. Observa-se que o nível potenciométrico possui semelhança com a superfície topográfica; B - Vetorização do fluxo para a sub-bacia do rio Grande; C - Vetorização do fluxo para a sub-bacia do rio São Desidério. Os vetores em branco indicam a descarga e os vetores vermelhos o fluxo em movimentação.

Em relação à calibração do modelo foi obtido um Erro Médio Quadrático (NRMS, na sigla inglesa) de 9,302%, que é considerada uma porcentagem de erro satisfatória, uma vez que são considerados modelos aceitáveis aqueles que possuem NRMS abaixo de 10% (Coelho *et al.* 2017). Esse erro é associado às incertezas intrínsecas associadas ao modelo, que é uma simplificação da realidade, como taxa de recarga e variação de parâmetros hidrodinâmicos. Além disso, foi obtido um coeficiente de correlação de 95,8%. É possível ver o gráfico de calibração com os resultados de carga calculada versus carga observada na Figura 17.

Destaca-se a necessidade de obtenção de novos dados de observação e parâmetros hidráulicos para uma melhor precisão nos resultados. Para o presente estudo, com a devida calibração e análise do modelo inicial foi possível partir para a simulação e análise dos cenários hipotéticos envolvendo baterias de poços.

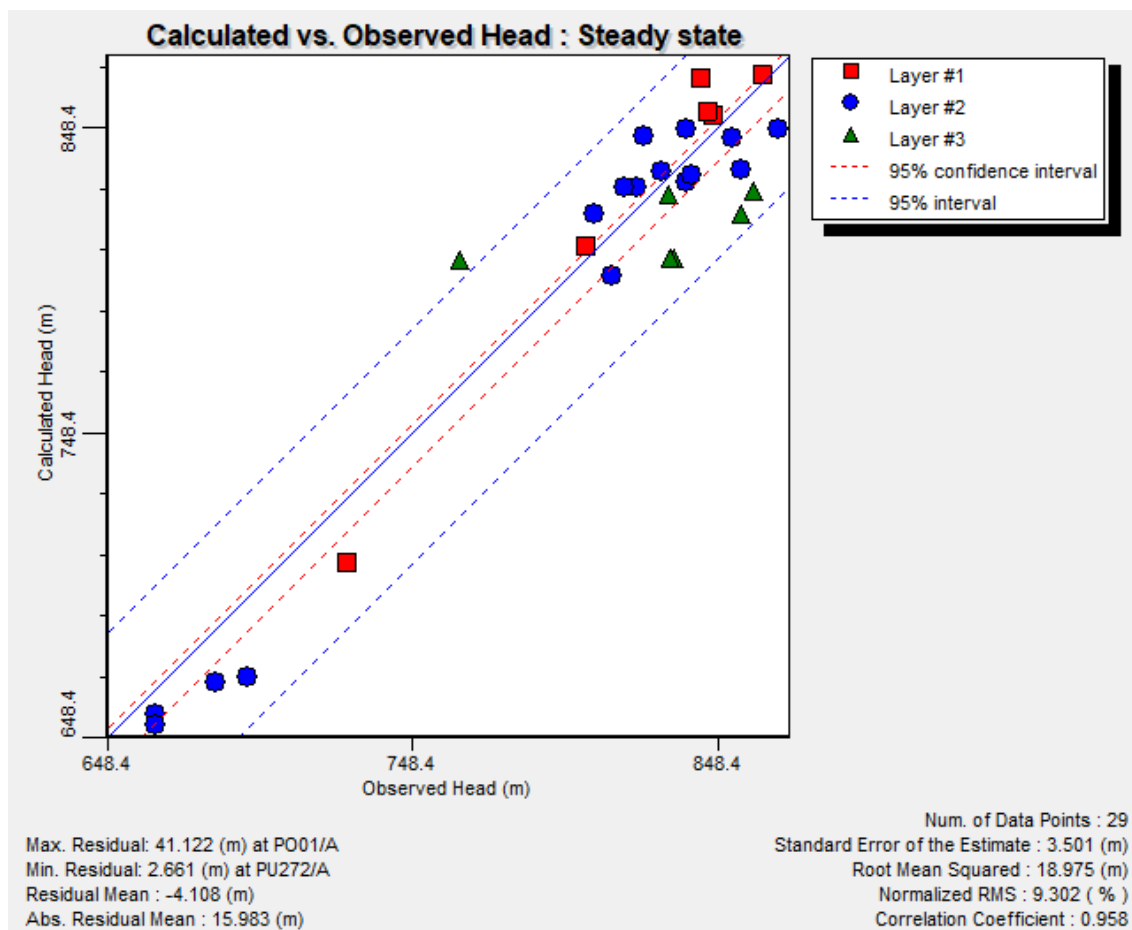


Figura 17 - Gráfico de calibração do modelo demonstrando uma modelagem satisfatória com valor de NRMS válido. Foram utilizados 29 pontos nas diferentes camadas do modelo para a calibração da carga, se obtendo um coeficiente de correlação de 0,958 e um erro médio residual normalizado de 9,3 %.

5.1 Região Central

Podem-se observar os resultados dos rebaixamentos para quatro cenários simulados para a região central do modelo na Tabela 5 e figuras 18 e 19.

Tabela 5 – Resultados dos cenários de simulação para a região central.

Região Central	Especificação do cenário	Rebaixamento no centro da bateria de poços	Raio de rebaixamento
Cenário 1	2500 m de distanciamento; 9000 m ³ /dia	4,5 - 4 m	≈14 km
Cenário 2	1500 m de distanciamento; 9000 m ³ /dia	9 - 8 m	≈12 km
Cenário 3	1500 m de distanciamento; 5400 m ³ /dia	5 - 4 m	≈9 km
Cenário 4	1000 m de distanciamento; 5400 m ³ /dia	7 - 6 m	≈8 km

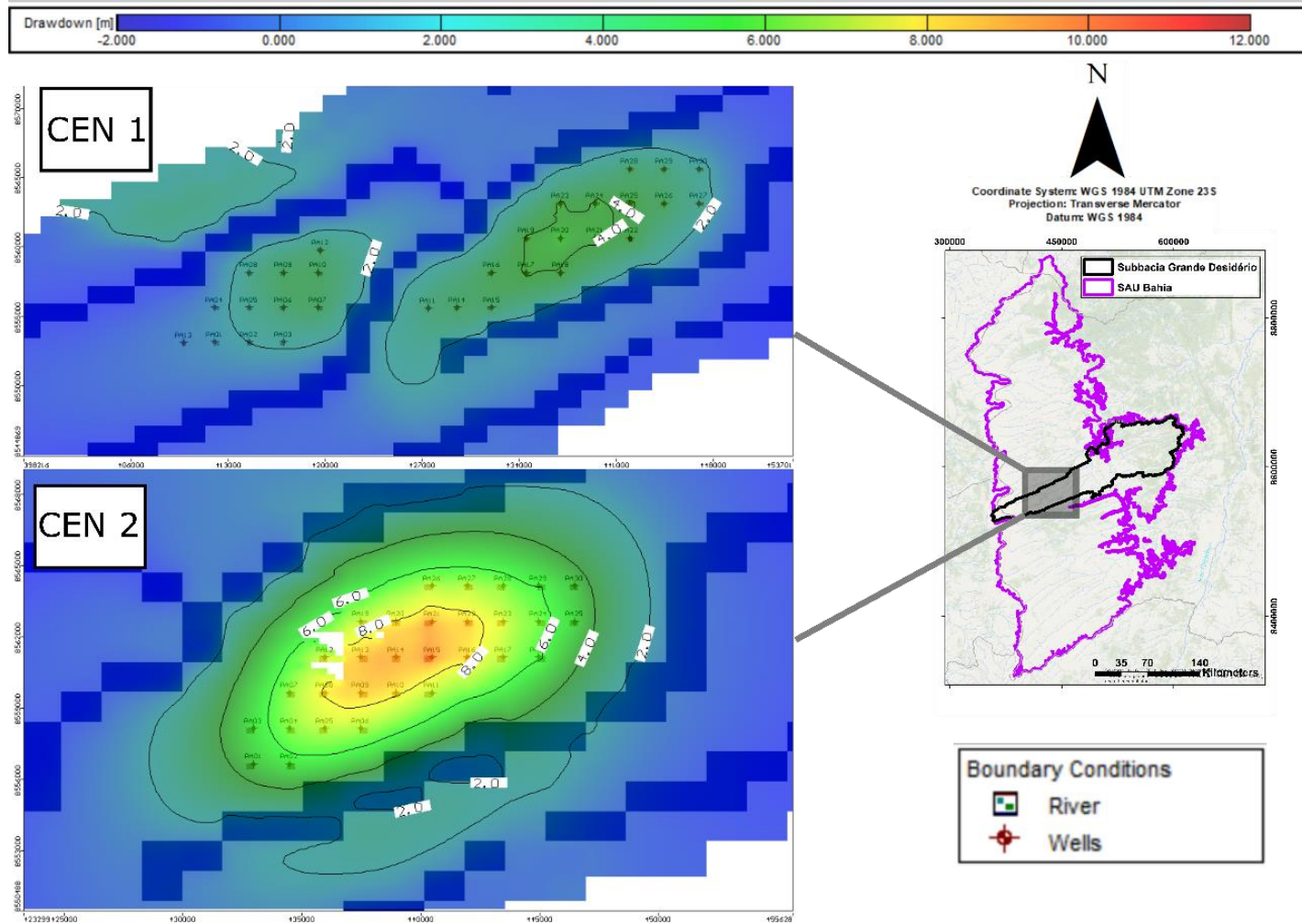


Figura 18 - Rebaixamento para os cenários de simulação 1 e 2 na região central da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 4 metros no cenário 1, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 2 o rebaixamento chega a mais de 8 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.

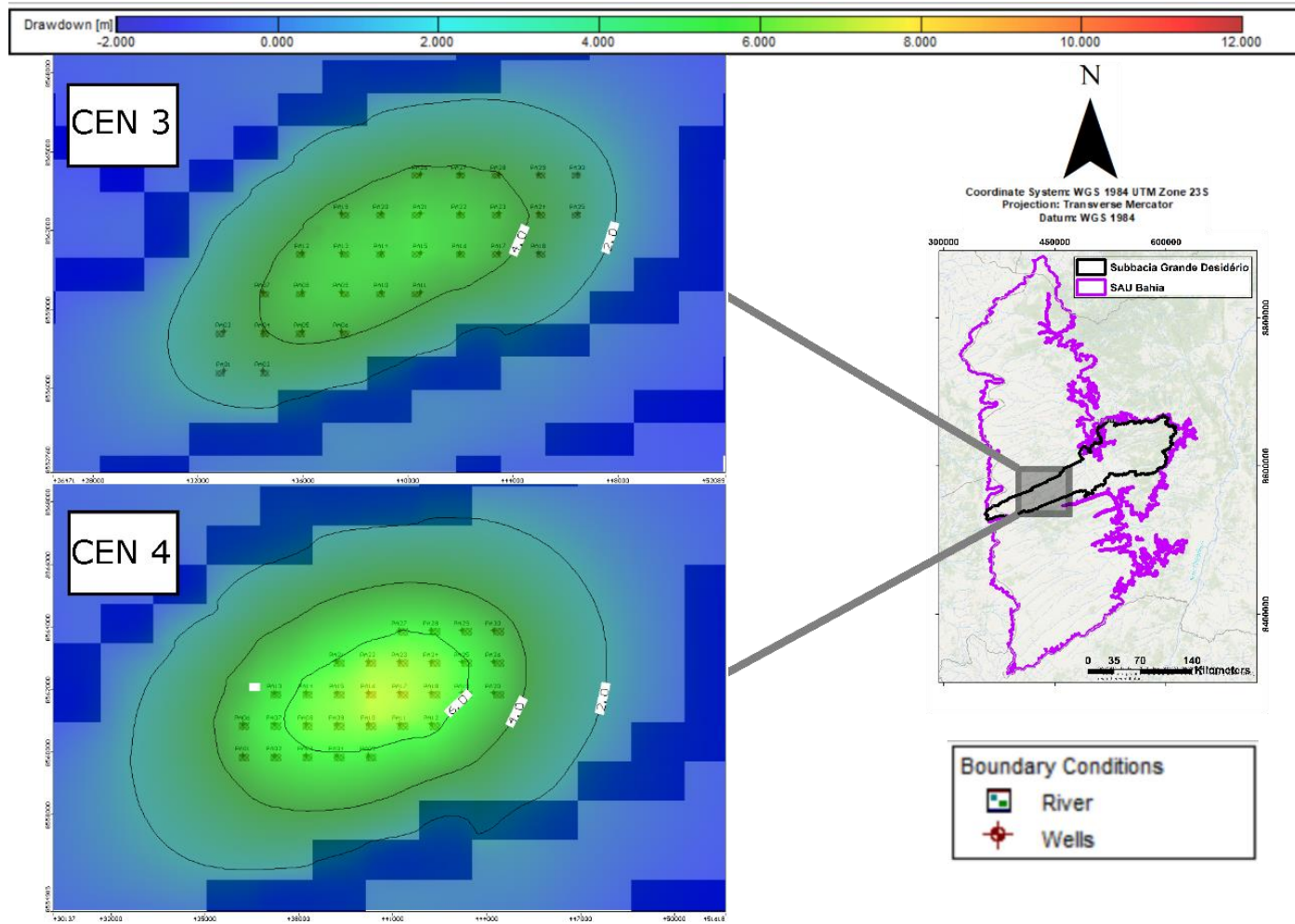


Figura 19 - Rebaixamento para os cenários de simulação 3 e 4 na região central da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 4 metros no cenário 3, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 4 o rebaixamento chega a mais de 6 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.

Primeiramente, cabe destacar a limitação do cenário 1, com distanciamento de 2500 m entre os poços, pela rede de drenagem da região que fez com que esse cenário, diferente dos outros, fosse simulado com duas baterias de poços separadas pelos rios. Esse cenário, junto com o cenário 3, que são cenários previamente permitidos pela IN 3, apresentaram menores rebaixamentos na região central da bateria em comparação aos cenários 2 e 4. Dessa forma, infere-se que a combinação de uma maior vazão de bombeamento com um menor distanciamento entre os poços provocou esse maior rebaixamento para os dois últimos cenários citados, devido a uma possível interferência entre os poços ao longo do tempo. O raio de rebaixamento para os cenários 1 e 2 foram os maiores dentro das simulações para essa região, chegando a mais de 10 km, sendo explicado pelo maior espaçamento entre os poços nesses cenários, aumentando a área de influência, e uma maior vazão de bombeamento diária comparado aos cenários 3 e 4.

Nas figuras 20 e 21 pode-se observar os resultados das simulações após o uso da ferramenta *MODPATH*.

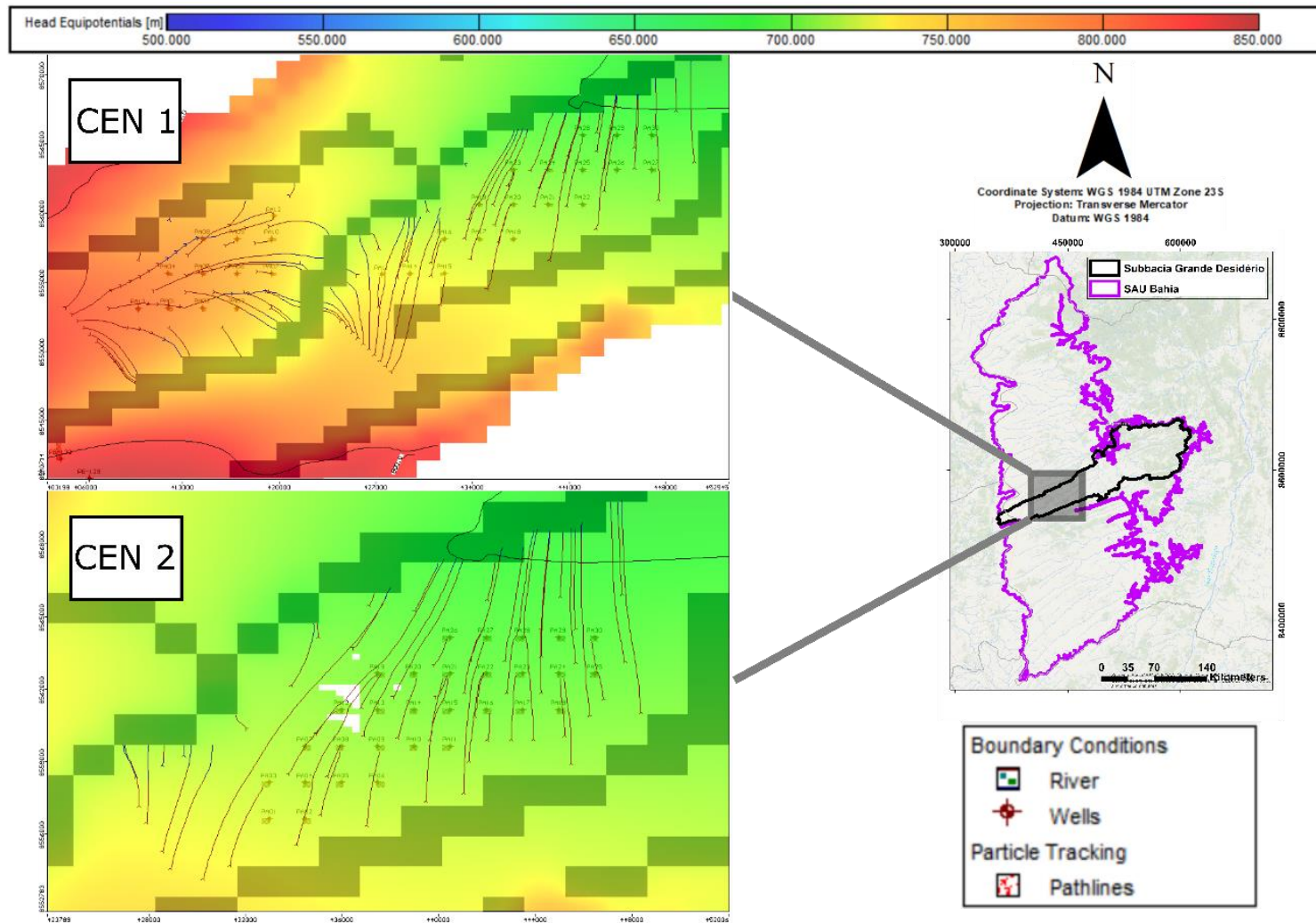


Figura 20 – Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 1 e 2 na região central da área de estudo. É possível observar que as linhas de fluxo tendem a seguir o caminho natural do gradiente hidráulico, se direcionando para as células de condição River.

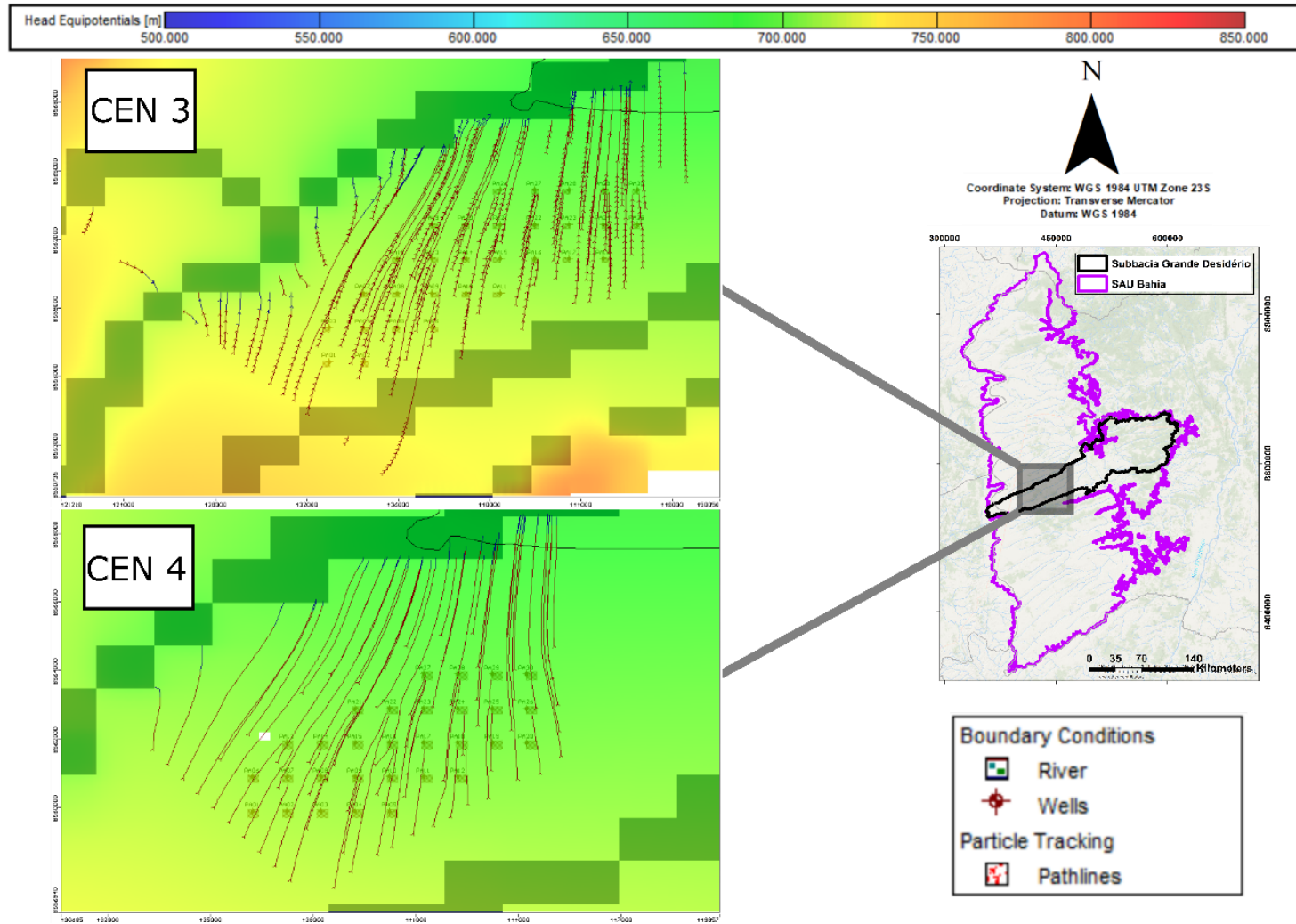


Figura 21 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 3 e 4 na região central da área de estudo. Pode-se observar que as linhas de fluxo tendem a seguir o caminho natural de montante a jusante, com captura restrita do fluxo pelas baterias de poços nesses cenários.

Nota-se que, de maneira geral, para todos os cenários de simulação, ocorre a tendência de continuidade das linhas de fluxo seguindo o gradiente hidráulico e se destinando às células de condição *River*, na forma de descarga (linhas azuis). É possível perceber uma captura, ainda que restrita, das linhas de fluxo pela zona de influência de bombeamento dos poços, principalmente nos cenários com distanciamento menor ou igual a 1500 m. De maneira geral, os cenários apresentados não geraram uma inversão de fluxo local no período simulado de 10 anos.

Em relação à ferramenta *ZONEBUDGET*, levando em conta o balanço hídrico para toda a área do modelo, houve uma extração através do bombeamento nos cenários 1 e 2 equivalentes a 6% do volume de recarga da área de estudo (459.290 m³/dia), e uma diminuição de 2% na descarga subterrânea para os rios. Nos cenários 3 e 4 a extração através do bombeamento dos poços representou 4% do volume de recarga da área de estudo (351.290 m³/dia), enquanto houve uma diminuição de 1% do fluxo de base para os rios. A pequena influência do bombeamento no fluxo de base dos rios pode ser explicada pela distância das baterias de poços em todos os cenários, respeitando uma distância mínima de 2,5 km para os corpos hídricos superficiais, ou seja, foram simulações conservadoras no sentido de avaliar o efeito da extração das águas subterrâneas nos rios. Além disso, o posicionamento dos filtros em altas profundidades pode ter atenuado o efeito nos rios.

5.2 Região Leste

Podem-se observar os resultados dos quatro cenários simulados para a região central do modelo na Tabela 6 e figuras 22 e 23.

Tabela 6 – Resultado dos cenários simulados para a região leste da área de estudo.

Região Leste	Especificação do cenário	Rebaixamento no centro da bateria de poços	Raio de rebaixamento
Cenário 1	1500 m de distanciamento; 5400 m ³ /dia	17 - 16 m	≈15 km
Cenário 2	1000 m de distanciamento; 5400 m ³ /dia	20 m	≈15 km
Cenário 3	1000 m de distanciamento; 3600 m ³ /dia	13 - 12 m	≈13 km
Cenário 4	500 m de distanciamento; 3600 m ³ /dia	16 - 14 m	≈13 km

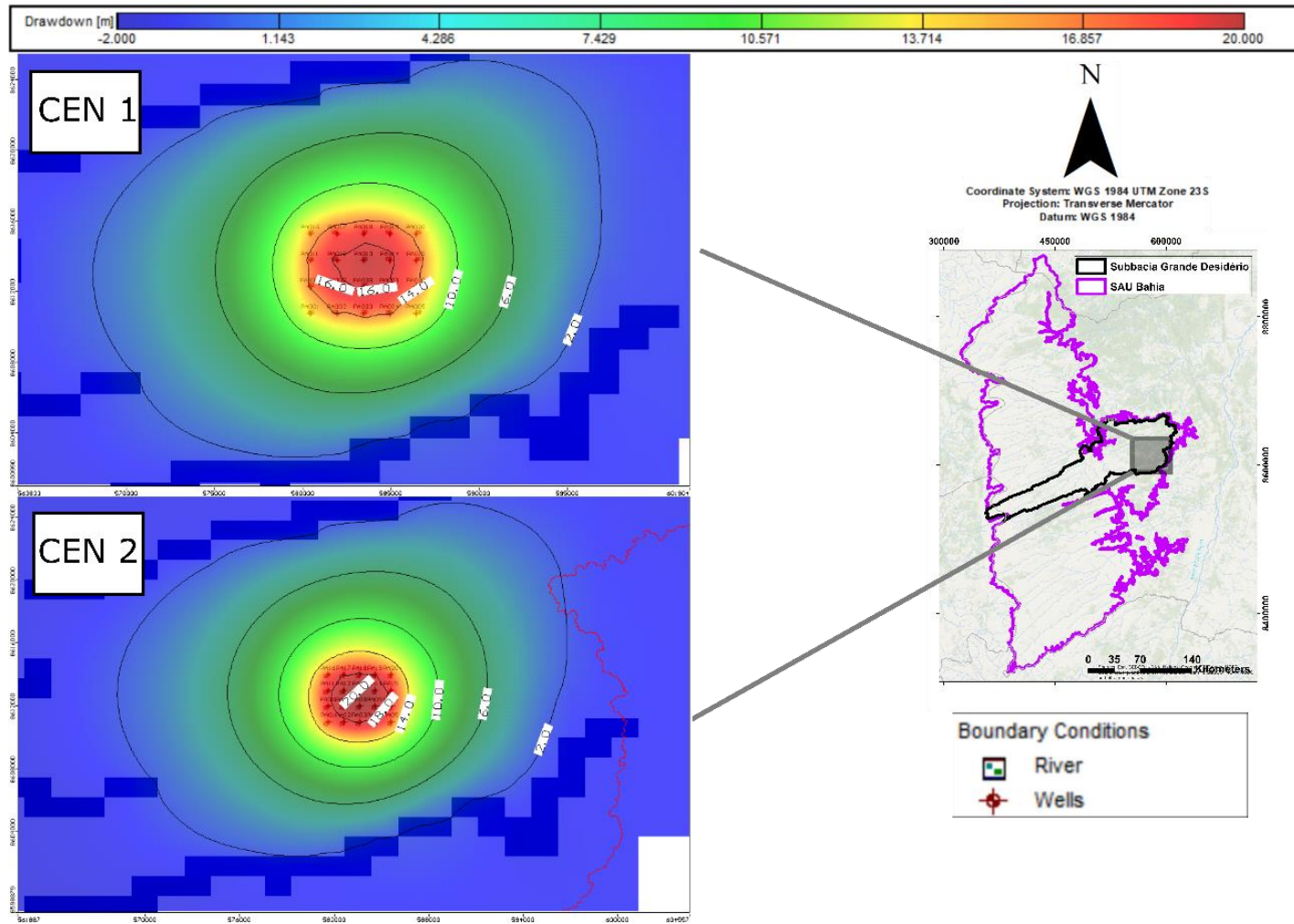


Figura 22 - Rebaixamento para os cenários de simulação 1 e 2 na região leste da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 16 metros no cenário 1, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 2 o rebaixamento chega a mais de 20 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3

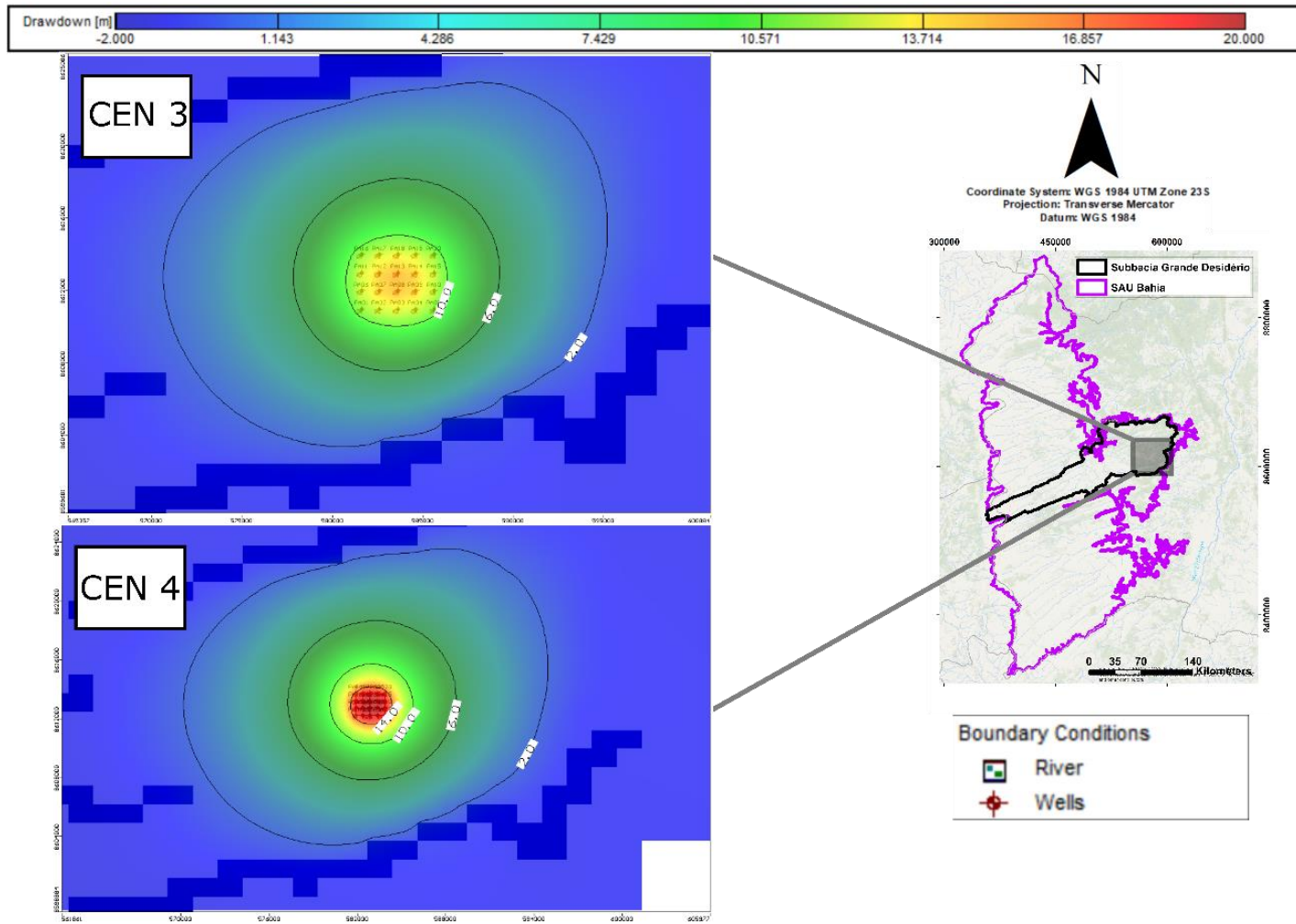


Figura 23 - Rebaixamento para os cenários de simulação 3 e 4 na região leste da área de estudo. Observa-se um rebaixamento de mais de 12 metros no cenário 3, respeitando as diretrizes da IN 3, enquanto no cenário 4 o rebaixamento chega a mais de 14 metros no centro da bateria de poços, extrapolando o limite mínimo de distanciamento imposto pela IN 3.

Assim como nas simulações para a área Central, aqui os cenários 1 e 3 respeitam as diretrizes de distanciamento previamente estabelecidas na IN 3. Nota-se que os cenários 1 e 2 foram os que apresentaram maior rebaixamento, demonstrando a influência de uma maior vazão diária no rebaixamento. Além disso, esses cenários apresentaram um maior raio de influência do rebaixamento provocado pelas baterias de poços, chegando a uma distância de 15 km de influência a partir do centro da bateria. Mesmo com número de poços e vazões de extração menores em comparação à área Central, os resultados dos cenários hipotéticos para a área Leste, na sub-bacia do rio São Desidério, apresentam maiores rebaixamentos no centro das baterias e raios de influência de maior extensão. Isso se explica pela menor espessura saturada e taxa de recarga, ou seja menor disponibilidade hídrica, para essa região, em comparação à região Central, expressado pelo maior rebaixamento e pela menor transmissividade da camada filtrante, na qual estão localizados os poços na região Leste, além das diferenças de condutividade hidráulica entre as camadas do modelo nas diferentes regiões, gerando um maior raio de rebaixamento.

Nas figuras 24 e 25 pode-se observar os resultados das simulações para a região leste da área de estudo após o uso da ferramenta *MODPATH*.

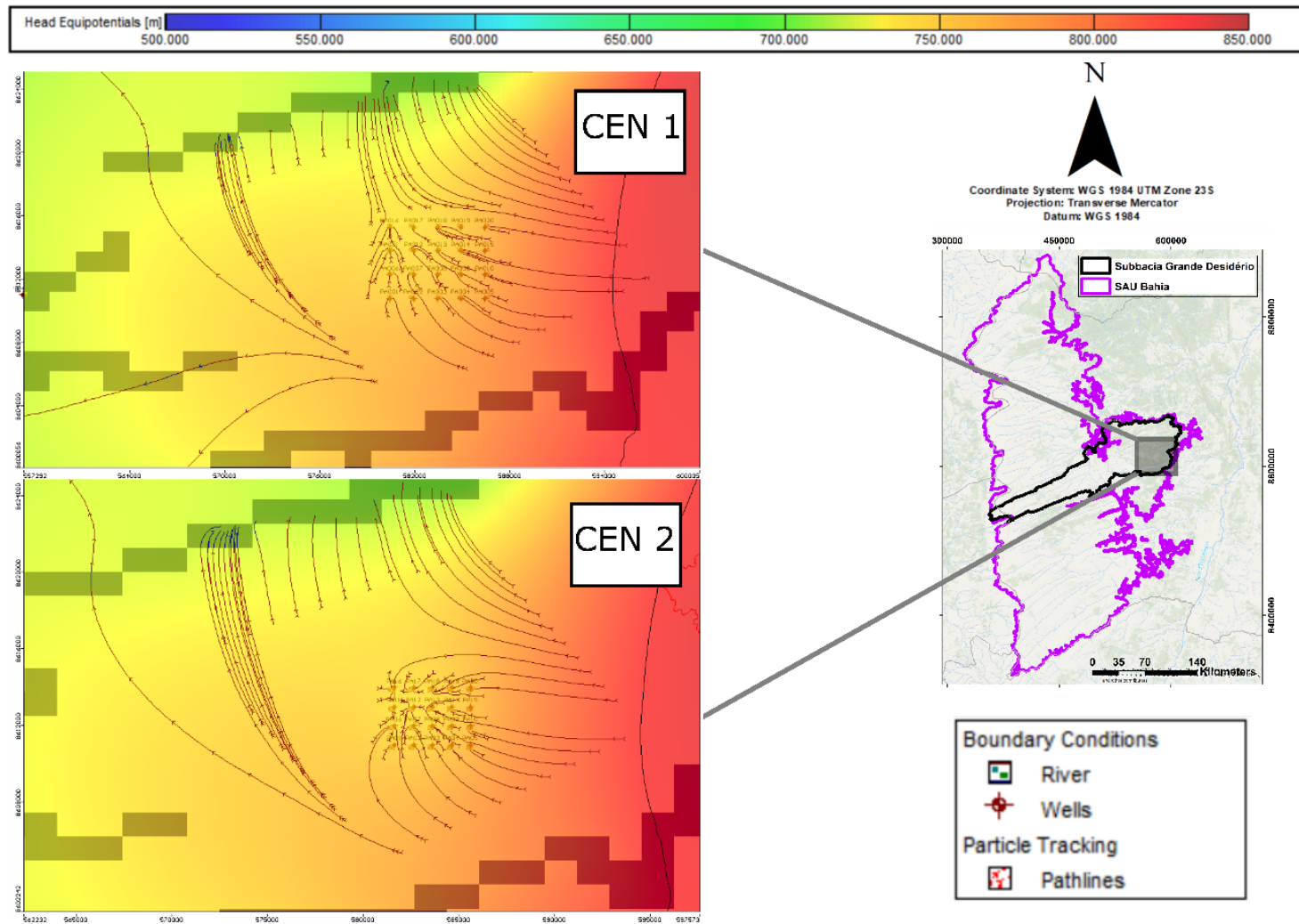


Figura 24 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 1 e 2 na região leste da área de estudo. Diferentemente dos cenários simulados para a região central, observa-se uma influência muito maior da bateria de poços nas linhas de fluxo, capturando parte do fluxo que se direciona de montante a jusante.

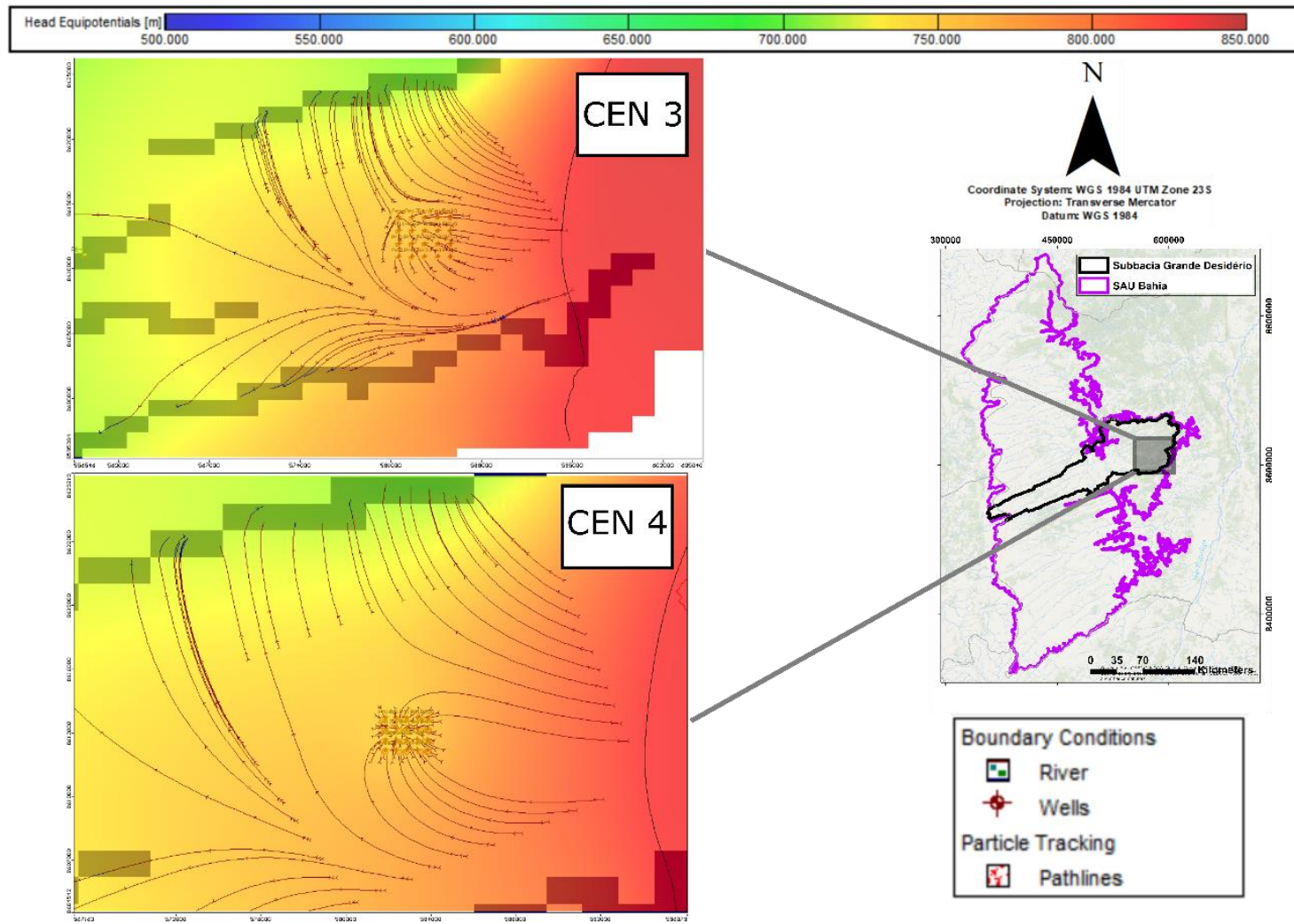


Figura 25 - Direcionamento do fluxo local para os cenários de simulação 3 e 4 na região leste da área de estudo. Nesses dois últimos cenários é possível observar uma nítida influência da zona de influência dos poços capturando parte das linhas de fluxo.

Em oposição aos cenários simulados para a região Central do modelo, pode-se observar nas figuras 24 e 25 que as baterias de poços nos quatro cenários capturam parte do fluxo que vem a montante em direção à zona de descarga dos rios. Como dito anteriormente, essas diferenças entre as duas regiões se justificam por diferentes propriedades hidrodinâmicas, como a condutividade hidráulica. É possível ver essa mudança na trajetória do fluxo sendo capturado pelo raio de influência dos poços claramente nos últimos três cenários. Embora ocorra essa captura de parte do fluxo que se destinava aos rios, não é possível notar a retirada de água dos corpos superficiais pelos poços pois, assim como nas simulações para a sub-bacia do rio Grande, as distâncias das baterias para os rios aqui são de mais de 2500 metros e os filtros estão posicionados em regiões mais profundas nos poços.

Quanto à aplicação do *ZONEBUDGET*, foi constatado que os cenários 1 e 2 apresentaram um volume de bombeamento equivalente a cerca de 3,9% da taxa de recarga diária (297.290 m³/dia), enquanto a diminuição do fluxo de base foi de apenas 0,7%. Já para os cenários 3 e 4 o volume diário bombeado foi de 3,4% da recarga (261.290 m³/dia) enquanto houve uma diminuição de 0,4% da descarga para os rios. Esses resultados do balanço hídrico corroboram com a hipótese citada anteriormente da pequena influência no fluxo de base pelo posicionamento das seções filtrantes e distanciamento em relação aos corpos hídricos superficiais.

Cabe ressaltar que o balanço hídrico nos cenários simulados para ambas as regiões foi realizado em toda a área do modelo, sendo importante atentar também para a escala em que é realizado o balanço de massas, uma vez que o resultado pode ser diferente dependendo da zona selecionada. Para efeito comparativo foi utilizado o *ZONEBUDGET* numa área restrita de 456 km² englobando 30 poços bombeando 500 m³/h com distanciamento de 2500 m na região Central, e numa área de 345 km² englobando 20 poços bombeando 300 m³/h com distanciamento de 1500 m na região Leste. Os resultados foram de extração através do bombeamento de 84,6% e 50,7% da recarga diária, respectivamente, demonstrando a mudança do balanço de acordo com a escala de análise.

Foi definido pela ANA (2013) um indicador chamado Coeficiente de Sustentabilidade (CS), que pode variar entre 0,1 e 1,0, representando um percentual máximo da Recarga Potencial Direta (RPD), a fim de determinar a disponibilidade

hídrica subterrânea e evitar a superexploração dos aquíferos e efeitos adversos no fluxo de base dos rios conectados a esses aquíferos. Para o Sistema Aquífero Urucuia foi determinado um CS de 0,2, levando em conta a alta transmissividade e grande contribuição do aquífero para os corpos hídricos superficiais localizados dentro de seu domínio. Dessa forma, podemos dizer que a extração equivalente a 84,6% da recarga diária na zona restrita de 456 km² na região central (alto rio Grande), e o bombeamento equivalente a 50,7% da recarga diária na zona restrita de 345 km² na região leste (rio São Desidério), excedem muito os 20% do Coeficiente de Sustentabilidade definido pela ANA para o SAU. Isso traz um ponto de alerta sobre os possíveis projetos de implantação de grande quantidade de poços de altas vazões em zonas restritas que podem surgir futuramente com a continuidade da expansão agrícola na região oeste da Bahia.

6. CONCLUSÕES

Obteve-se como resultado desse estudo um rebaixamento variando de 4 a 8 metros na região central e de 10 a 20 metros na região Leste da área de estudo, após 10 anos de bombeamento. Ao analisar o balanço hídrico constatou-se que em nenhum cenário de bombeamento chegou-se a 10% do valor de recarga diário em toda a extensão do modelo, e que as baterias de poços tiveram pequeno impacto na descarga subterrânea para os rios. A ferramenta *MODPATH* permitiu a análise e visualização da área de influência da captação dos poços gerando desvios na trajetória do fluxo subterrâneo.

A criação das instruções normativas INGÁ nº 15 e INEMA nº 3 foram medidas importantes no sentido de uma gestão integrada do Sistema Aquífero Urucuaia. Ainda assim há grande espaço de melhora e são necessárias medidas para uma contínua evolução na gestão desse grande manancial subterrâneo que, ao mesmo tempo que tem grande importância para o desenvolvimento econômico da região, seja através da irrigação de grandes culturas ou pelo uso pela população local e pequenos produtores, vital para a subsistência dessas populações históricas, possui papel determinante para a manutenção das vazões do rio São Francisco.

Esse estudo demonstrou, através da aplicação do *Visual Modflow Classic* na bacia do rio Grande, sub-bacias do alto rio Grande e São Desidério que é possível a utilização de um modelo de fluxo numérico como suporte na análise de requerimentos para perfuração de poços tubulares e uso das águas subterrâneas no oeste da Bahia. A simulação das cargas hidráulicas em conjunto com a avaliação do rebaixamento, balanço hídrico e trajetória de fluxo dentro de um período de 10 anos, tem potencial relevante no auxílio à gestão, e pode servir como complemento juntamente com a análise da documentação atualmente requerida, ajudando com suporte na tomada de decisão dos técnicos responsáveis pela análise dos processos. Além disso, esse período de simulação de 10 anos possibilita a previsão de um cenário futuro, permitindo a antecipação no planejamento do órgão gestor para possíveis mudanças nas diretrizes.

Após a elaboração e calibração do modelo é possível realizar diversos cenários de simulação conforme exemplificado no presente estudo. Isso possibilita ao gestor verificar o efeito de um eventual bombeamento na localidade em que o poço objeto de um requerimento será perfurado antes da sua execução física.

Cabe ressaltar aqui uma limitação referente ao modelo: o SAU possui cerca de 82.000 km² de extensão no estado da Bahia, dessa forma é preferível que se trabalhe com modelos no formato de bacias ou sub-bacias, pois modelos em grandes áreas exigem um grande volume de processamento computacional, principalmente em regiões em que a malha necessite de um refinamento razoável para a avaliação dos efeitos do bombeamento.

Por fim, com base nos resultados e discussões decorrentes desse trabalho recomenda-se:

- Elaboração de um modelo numérico de fluxo em regime transiente, a fim de simular melhor os efeitos do bombeamento levando em conta a variação da recarga e cargas hidráulicas ao longo do tempo.
- Instalação de novos poços de monitoramento e estações fluviométricas de forma bem distribuída e com destaque para regiões carentes de dados, como a sub-bacia do rio São Desidério, para monitoramento do nível d'água e vazão dos rios.
- Simulações com baterias de poços próximas a corpos hídricos superficiais e com filtros em posições mais rasas, a fim de avaliar melhor o efeito do bombeamento nos rios.
- Exigência, no relatório técnico apresentado durante o processo de requerimento de outorga de direito de uso de águas subterrâneas, de apresentação de parâmetros hidrodinâmicos como condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento, fornecendo mais dados para modelagens futuras.
- Melhor caracterização do aquífero através de estudos locais e regionais a fim de determinar de forma mais assertiva a espessura do SAU e os tipos de aquífero que compõem esse sistema.
- Atualização periódica do modelo de fluxo, levando em conta a aquisição de novos dados.

7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas – ANA. 2013. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2013. 432 p.: li. ISBN 978-85-882100-15-8. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2013_rel.pdf.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. 2017. Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada Compartilhada: Volume 1 - Diagnóstico do Meio Físico da Região de Abrangência dos Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado: Tomo I – Caracterização do Meio Físico, do Uso e Ocupação da Terra, Levantamento Hidrogeológico e Investigações Geofísicas: relatório final / Agência Nacional de Águas; Elaboração e Execução: Consórcio Engecorps - Walm. -- Brasília: ANA, 2017. 138p.

Amorim Júnior, V., Lima, O.A.L., 2007. Avaliação Hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando resistividade e polarização elétrica induzida. Revista Brasileira de Geofísica. 25(2), 117-129. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2007000200002>.

Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press. Barlow, P. M., & Harbaugh, A. W. (2006). USGS directions in MODFLOW development. Groundwater, 44(6), 771- 774.

Arnold, J. G.; Kiniry, J. R.; Srinivasan, R.; Williams, J. R.; Haney, E. B.; Neitsch. S. L. Input/Output Documentation version 2012. Texas Water Resources Institute. 650p. 2012.

Barbosa, N. da S.; Leal, L. R. B.; Santos, R. L. dos S.; Mello, J. de C. Caracterização hidro-estratigráfica do Sistema Aquífero Urucuia com base em perfis geofísicos de poços. Águas Subterrâneas, [S.l.], 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28374>. Acesso em: 11 maio. 2022.

Barbosa, N.S. 2016. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia, Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 168p

Campos, J. E. G. 1996. Estratigrafia, Sedimentação, Evolução Tectônica e Geologia do Diamante da porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília (DF). Tese de Doutorado. 204p.

Campos, J. E.; Dardenne, M. A. 1997a. Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. Revista Brasileira de Geociências, 27 (3): 269-282.

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Diagnóstico consolidado da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Relatório Parcial, volume 1. 489p. 2015.

Chang, H.K.; Bender, A.A & Kowsmann, R.O. 1992. O papel das tensões intraplaca na evolução de bacias sedimentares: exemplo da Formação Urucuia. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37. São Paulo, 1992. Anais.São Paulo, SBG. Vol. 2., 568 e 569.

Chang, H.K.; Silva, F.P.E. 2015. Contribuição ao arcabouço geológico do Sistema Aquífero Urucuia. *Geociências*, 34(4):872 –882.

Coelho, C. D., Faria, A. C. S., & Marques, E. A. G. (2017). Comparative analysis of different boundary conditions and their influence on numerical hydrogeological modeling of Palmital watershed, southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 210–219. doi:10.1016/j.ejrh.2017.05.006

Costa Bonfim, L. F.; Dias Gomes, R. A. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura Ideias para Discussão. *Águas Subterrâneas*, [S. 1.], n. 1, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23330>. Acesso em: 13 maio. 2022.

Diersch, H. J. G. (2005). FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system. Inst. for Water Resources Planning and System Res., Berlin

Donagemma, G.K. *et al.* 2016. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 51, 1003–1020. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>.

Eger, G.Z.S., Silva Junior, G.C., Marques, E.A.G., Leão, B.R.C., Rocha, D.G.T.B., Gilmore, T.E., Amaral, L.G.H., Silva, J.A.O., Neale, C. (2021). Recharge Assessment in the Context of Expanding Agricultural Activity: Urucuia Aquifer System, western State of Bahia, Brazil, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 112, Part 1, 2021, 103601, ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103601>.

Gonçalves, R. D., Engelbrecht, B. Z., & Chang, H. K. (2017). Evolução da Contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil. *Águas Subterrâneas*, 32(1), 1–10. <https://doi.org/10.14295/ras.v32i1.28916>

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

Gaspar M.T.P. & Campos J.E.G. 2007. O Sistema Aquífero Urucuia. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):216-226.

Guira, M. "Numerical Modeling of the Effects of Land Use Change and Irrigation on Streamflow Depletion of Frenchman Creek, Nebraska" (2018). *Dissertations & Theses in Earth and Atmospheric Sciences*. 103.

Harbaugh, A.W., 1990, A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392, 46 p., <https://doi.org/10.3133/ofr90392>

Karner, G.D. 1986. Effects of lithospheric in-plane stress on sedimentary basin stratigraphy. *Tectonics*, 5:573-588.

Karner, G.D.; Steckler, M.S. & Thorne, J.A. 1983. Long-term-thermo-mechanical properties of the continental lithosphere. *Nature*, 304:250-253.

Mantovani, E. C. *et al.* 2019. 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 Carinhanha. Relatório técnico final. Viçosa: AIBA, 2019. Disponível em: <https://aiba.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Relatório-final-Estudo-dos-Recursos-Hidricos-naRegião-Oeste-da-Bahia-v2.pdf>.

Mantovani, E. C. *et al.* 2021. Sistema integrado de inteligência territorial para gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada no Oeste da Bahia. Relatório técnico final. Viçosa: AIBA, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357936341_RELATORIO_TECNICO_FINAL.

Marques, E. A. G., Silva Junior, G. C., Eger, G. Z. S., Ilambwetsi, A. M., Raphael, P., Generoso, T. N., ... Júnior, J. N. (2020). Analysis of groundwater and river stage fluctuations and their relationship with water use and climate variation effects on Alto Grande watershed, Northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 102723. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102723>.

Mcdonald, M.G.; Harbaugh, A.W. 2003. The History of MODFLOW. *Ground Water* 41(2):280-283. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02591.x

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry J. R., Williams J. R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.

Pimenta, F. M., Speroto, A. T., Costa, M. H., & Dionizio, E. A. (2021). Historical Changes in Land Use and Suitability for Future Agriculture Expansion in Western Bahia, Brazil. *Remote Sensing*, 13(6), 1088. <https://doi.org/10.3390/rs13061088>

Pimentel, A. L.; Aquino, R. F.; Silva, R. C. A.; Vieira, C. M. B. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia da sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português, 1., 2000, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2000.

Pollock, D.W. 1994. User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT. Version 3: A Particle Tracking Post-Processing Package for MODFLOW, the US Geological Survey Finite-Difference Ground-Water Flow Model.

Pollock, D.W., 2012, User guide for MODPATH version 6—A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A41, 58 p.

Pousa R, Costa MH, Pimenta FM, Fontes VC, Brito VFAd, Castro M. Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring. *Water*. 2019; 11(5):933. <https://doi.org/10.3390/w11050933>.

Ramos, C. A. Avaliação dos Critérios Vigentes de Outorga de Recursos Hídricos Subterrâneos: Caso do Sistema Aquífero Urucuia, Oeste da Bahia. 2020. 60 f. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.

Tschiedel, M.W. 2004. Aplicação de Estudo Geofísico como Contribuição ao Conhecimento da Tectônica da Sub-Bacia Urucuia. 2004. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.

Vieira, M. de S.B. Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica. 2021. 217 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.