



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – PROFÁGUA
ESCOLA POLITÉCNICA

**AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS VIGENTES DE
OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS: CASO DO SISTEMA AQUÍFERO
URUCUIA, OESTE DA BAHIA**

Caroline Assunção Ramos

CAROLINE ASSUNÇÃO RAMOS

**AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS VIGENTES DE OUTORGA DE RECURSOS
HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: CASO DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA,
OESTE DA BAHIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, do curso do Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade Federal da Bahia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

Co-orientadora: Prof. Dra. Andrea Sousa Fontes

R175 Ramos, Caroline Assunção.

Avaliação dos critérios vigentes de outorga de recursos hídricos subterrâneos: caso do sistema aquífero Urucuia, oeste da Bahia/ Caroline Assunção Ramos. – Salvador, 2020.

60 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal.

Coorientadora: Profa. Dra. Andrea Sousa Fonte.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2020.

1. Recursos hídricos. 2. Águas subterrâneos e superficiais. 3. Aquíferos. 4. Modelagem. 5. Outorga. I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II. Fonte, Andrea Sousa. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 333.91



Caroline Assunção Ramos

“Avaliação dos Critérios Vigentes de Outorga de Recursos Subterrâneos: Caso do Sistema Aquífero Urucuia, Oeste da Bahia”

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Universidade Federal da Bahia

Profa. Dra. Andrea Sousa Fontes
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Jaildo Pereira Santos
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Cristovaldo Bispo dos Santos
Universidade Federal da Bahia

Salvador,
01 de dezembro de 2020

A Melissa, fonte da minha alegria

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a chegada da minha menina Melissa, por me trazer alegria, motivação e força. Agradeço, de forma elementar, a minha querida mãe, Jaciara, por sempre me proporcionar luz e direção. Ao meu companheiro Pedro, por me ajudar com muito amor de todas as formas possíveis e impossíveis nessa fase final de estudos. Ao meu pai e aos meus irmãos, Ednilson, Douglas e Júnior, por estarem comigo em todas as situações.

Agradeço aos meus professores Luiz Rogério e Andréa por trilharem comigo de forma dedicada e paciente esse estudo, por todas as orientações e contribuições essenciais. Aos meus colegas e grandes amigos do ProfÁgua, por todos os momentos e conhecimentos compartilhados, sempre com leveza e lealdade. As minhas queridas amigas geólogas, Leticia, Juliana, Vitória e Uiara.

Agradeço ao Sr Luis e a fazenda Nordeste Florestal por todos os recursos e informações essenciais ao desenvolvimento deste trabalho. Aos funcionários da Water Services and Technologies, em especial Nilson e Sophia, por me recepcionarem de forma cordial e me ensinarem a arte de modelar águas subterrâneas.

Agradeço aos funcionários da UFBA, que de forma direta e indireta foram responsáveis pela otimização do trabalho. Em especial, ao Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e Ambientais (NEHMA), por conceder toda a infra-estrutura necessária a realização dos estudos.

Finalmente, agradeço a ANA e a CAPES por trazer de forma inovadora esse curso de mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado.

RESUMO

O escopo desse estudo é o planejamento integrado de águas subterrâneas e superficiais, na avaliação dos critérios vigentes de outorga. Foram realizadas modelagens locais no trecho do alto da bacia hidrográfica do Rio Formoso, nos limites extremos ocidentais do Sistema Aquífero Urucuia (SAU). Essa área localiza-se nas proximidades da divisa entre os estados da Bahia e de Goiás. O objetivo geral é de avaliar a modelagem como ferramenta de suporte a decisão de forma integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais. Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizados dados e informações já obtidas em trabalhos anteriores. Estão disponíveis dados sobre a geometria do aquífero e do fluxo subterrâneo local, testes de bombeamento, análises isotópicas e da qualidade das águas subterrâneas e superficiais. A modelagem do fluxo subterrâneo foi realizada através do software Visual MODFLOW Classic. Dados de saída dessas simulações, como a contribuição aquífero/rio e a reserva hídrica subterrânea foram inseridos no modelo em rede de fluxo para alocação de água (Acquanet), integrando com dados de vazão das águas superficiais e os seus diversos usos. Realizou-se simulações de cenários de bombeamentos ao longo de 100 anos. Concluiu-se que o planejamento integrado do uso de recursos hídricos subterrâneos e superficiais pode ser realizado através de modelos matemáticos. O método utilizado nesse estudo aponta vantagens, como a possibilidade de uma análise mais assertiva e rápida dos efeitos que o bombeamento de poços causa nos rios e na depleção regional do aquífero. Além disso, modelos são simples de serem utilizados por hidrogeólogos e analistas técnicos dos órgãos gestores. Isso possibilita a inserção da análise de disponibilidade hídrica subterrânea na rotina da avaliação dos processos de outorga. Outra vantagem é que os estudos serão realizados localmente, evitando a extrapolação de informações e fomentando a aquisição de dados hidrodinâmicos do aquífero. O produto dessa dissertação foi a proposição de um modelo de sistema de suporte a decisão para recursos hídricos subterrâneos, em aquíferos sedimentares com expressiva conexão hidráulica com rios.

Palavras-chave: Outorga; Modelagem; Aquíferos.

ABSTRACT

The scope of this study is the integrated planning of ground and surface water, in the assessment of the current grant criteria. Local modeling was carried out in the upper section of the Rio Formoso hydrographic basin, at the western extreme limits of the Urucuia Aquifer System (SAU). This area is located in the border between the Bahia and Goias states. The general objective is to evaluate modeling as a tool to support decision making in an integrated manner of ground and surface water resources. To achieve the proposed objectives, data and information already obtained in previous works were used. Data on the geometry of the aquifer and the local underground flow, pumping tests, isotopic analyzes and the quality of ground and surface water are available. Underground flow modeling was performed using the Visual MODFLOW Classic software. Output data from these simulations, such as the river / aquifer contribution and the underground water reserve, were inserted in the flow network model for water allocation (Acquanet), integrating with surface water flow data and its various uses. Simulations of pumping scenarios were carried out over 100 years. It was concluded that the integrated planning of the use of underground and surface water resources can be carried out through mathematical models. The method used in this study points out advantages, such as the possibility of a more assertive and rapid analysis of the effects that pumping wells have on rivers and regional aquifer depletion. In addition, models are simple to be used by hydrogeologists and technical analysts of Organs management bodies. This makes it possible to insert the analysis of underground water availability into the routine of the evaluation of the granting processes. Another advantage is that the studies will be carried out locally, avoiding the extrapolation of information and promoting the acquisition of hydrodynamic data from the aquifer. The product of this dissertation was the proposal of a model of decision support system for underground water resources, in sedimentary aquifers with expressive hydraulic connection with rivers.

SUMÁRIO

1.0 CONSIDERAÇÕES GERAIS	11
1.1 Introdução	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Localização e acesso	12
2.0 REGIÃO OESTE DA BAHIA	15
2.1 Caracterização dos aspectos fisiográficos	15
2.1.1 Geologia	16
2.2 Águas subterrâneas e superficiais	18
2.3 Ocupação do espaço e conflitos pelo uso das águas	19
3.0 GESTÃO E PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS	22
3.1 Experiências internacionais em gestão de águas subterrâneas	22
3.2 Aspectos legais da outorga de recursos hídricos	23
3.3 Critérios estaduais para outorga no Aquífero Urucua	26
3.4 Modelagem aplicada a Gestão de Recursos Hídricos	27
4.0 POTENCIALIDADE HÍDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA	30
5.0 MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1 Modelagem de águas subterrâneas	37
5.2 Modelo de fluxo em rede para alocação de águas	41
6.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
9.0 APÊNDICE I -PRODUTO	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. A área da modelagem hidrogeológica está delimitada através do polígono amarelo	14
Figura 2 - Visão da BA 236, com a Serra Geral de Goiás. O relevo plano acima da serra é o Chapadão Ocidental Baiano, formado pelos arenitos neocretáceos do Grupo Urucuia. Coordenadas: X: 0379476 m / Y: 8527553 m.	16
Figura 3 - Perfil leste-oeste do contexto geológico do Sistema Aquífero Urucuia, na região oeste da Bahia.	17
Figura 4 - Arenito com estratificações cruzadas de grande porte associado a Formação Posse do Grupo Urucuia. Afloramento as margens da rodovia GO 236. Coordenadas: 0379476 m, 8527553 m. Altitude 763 metros	18
Figura 5 - Bacias Hidrográficas do rio São Francisco e dos rios Tocantins-Araguaia, com polígono vermelho destacado a área de estudo	19
Figura 6 – Evolução da ocupação do solo nas últimas décadas no oeste da Bahia.	21
Figura 7 - Fluxo do processo de outorga no INEMA, estado da Bahia.	24
Figura 8 – Exemplo de modelo físico hidrogeológico.....	28
Figura 9 - Conceitos utilizados para cálculo de disponibilidade hídrica subterrânea do SAU.	32
Figura 10 - Mapa de indicadores de disponibilidade instalada subterrânea na BH do rio Corrente.....	34
Figura 11 - Mapa de indicadores de disponibilidade instalada subterrânea na BH do rio Corrente.	35
Figura 12 – Esquema do método utilizado na pesquisa.	36
Figura 13 - Área do modelo delimitada através das condições de contorno “DRAIN” e “GHB”. As células verdes representam a área inativa do modelo, onde o fluxo de águas subterrâneas é zero	38
Figura 14 - Malha utilizada na modelagem hidrogeológica.	39
Figura 15 - Fluxo esquemático do método utilizado para a modelagem hidrológica e de avaliação de demandas hídricas	42
Figura 16 - Mapa com localização da estação fluviométrica Lagoa do Casamento em relação a área do modelo	42
Figura 17 – Curva-chave gerada através dos dados da estação fluviométrica Lagoa do Casamento	43
Figura 18 - Modelo de alocação de água num trecho do alto do rio Formoso. Os elementos foram identificados através de números para facilitar a descrição: 1. Vazão do escoamento de base; 2 – Vazões do rio menos o escoamento de base; 3 – Demandas de águas subterrâneas; 4 – Demandas de captação superficial; 5 – Vazão Remanescente do rio, a qual tem prioridade em todo o sistema; 6 – Elemento dreno que representa o deflúvio	46
Figura 19 - Mapa potenciométrico desenvolvido pelo modelo, zoom para divisor hidrogeológico	48
Figura 20 - Evolução do rebaixamento (drawdown) ao longo dos 100 anos de simulação	48
Figura 21 - Modelo 3d de elevação do nível da água após regime de bombeamento de 100 anos, numa taxa contínua de 18h/dia.	49
Figura 22 - Resultados do sistema de retiradas modelado através do software Acquanet. A) Cenário atual de retiradas. B) Cenário na qual a retirada superficial é de 80% da vazão de referência Q90. C) Cenário de exploração contínua do aquífero em 100 anos de bombeamento dos poços.....	51

1.1 INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) localiza-se na porção centro-oriental brasileira e corresponde a um dos mananciais hídricos mais importantes do Brasil. Em termos geológicos, é composto de formações aquíferas inter-relacionadas ao domínio do Grupo Urucuia, arenitos fluvio-eólicos neocretáceos. A sua ocorrência no oeste baiano possibilitou o rápido avanço da atividade agrícola, tendo em vista a exaustão das outorgas de captação superficial para finalidade de irrigação (Barbosa, 2017). Nessa região, há um aumento de conflitos pelo uso das águas, muitas vezes norteados pela falta de conhecimento técnico-científico sobre o aquífero.

Sendo assim, as instruções normativas vigentes para o uso das águas na região oeste do estado da Bahia têm sido amplamente discutidas por todos os setores usuários da água e pelo órgão gestor estadual, o Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA). Tendo em vista a acentuada interação aquífero/rio nessa região, fica evidente que é necessário um estudo que viabilize o planejamento integrado dos recursos hídricos. Além disso, as diretrizes para emissão de outorga de captação de águas subterrâneas foram determinadas através de estudos de bacias hidrográficas específicas (Rio das Fêmeas e Rio dos Cachorros). Os dados e números locais foram extrapolados para toda a área de ocorrência do aquífero. Dessa forma, são necessários estudos locais em outras bacias, afim de fundamentar os critérios de outorga de captação subterrânea.

O presente estudo tem como abordagem uma análise de detalhe do trecho do alto da bacia hidrográfica do Rio Formoso, nos limites extremos ocidentais do SAU. Nesse local, em termos hidrogeológicos, ocorre o divisor de fluxo de águas subterrâneas (direção N/S), nas proximidades da escarpa geomorfológica da Serra Geral de Goiás. Parte dos recursos hídricos subterrâneos deriva para oeste, onde contribui sob fortes gradientes hidráulicos para as nascentes dos rios Tocantins-Araguaia e outra para leste, onde mantém a perenidade dos rios da margem esquerda do médio São Francisco (Ramos, 2018). Apesar das amplas discussões e estudos sobre o SAU, ainda não se tem abordagens

locais, que levam em consideração as peculiaridades hidrodinâmicas do aquífero e da rápida implantação de projetos de irrigação.

Alguns dos questionamentos fundamentais para a elaboração da pesquisa são: Qual a contribuição do aquífero para o trecho escolhido do rio Formoso? Qual a projeção futura das altas taxas de bombeamento na depleção do aquífero e, conseqüentemente, do rio? Quais diretrizes devem ser adotadas para o planejamento integrado de recursos hídricos subterrâneos e superficiais? Quais os critérios devem ser estabelecidos na outorga de recursos hídricos subterrâneos?

Diante desse cenário, o escopo desse estudo é o planejamento integrado dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais no âmbito da outorga, através da avaliação de cenários atuais e futuros dos usos das águas. Os resultados, por ter um caráter de detalhe, poderá subsidiar a gestão dos recursos hídricos, sugerindo novas alternativas a exploração e garantindo o suprimento a longo prazo.

O produto dessa dissertação será a proposição de um modelo de sistema de suporte a decisão para recursos hídricos subterrâneos, em aquíferos sedimentares com expressiva conexão hidráulica com rios.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse estudo é avaliar a modelagem como ferramenta de suporte a decisão no planejamento e outorga de forma integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais no trecho do alto da sub-bacia do rio Formoso.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se: i) mensurar a interação aquífero/rio; ii) integrar modelos matemáticos de fluxos de águas subterrâneas e superficiais. iii) explanar sobre os critérios atualmente utilizados na emissão de outorga; e, por fim, iv) sugerir diretrizes para aperfeiçoar a gestão integrada de recursos hídricos.

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

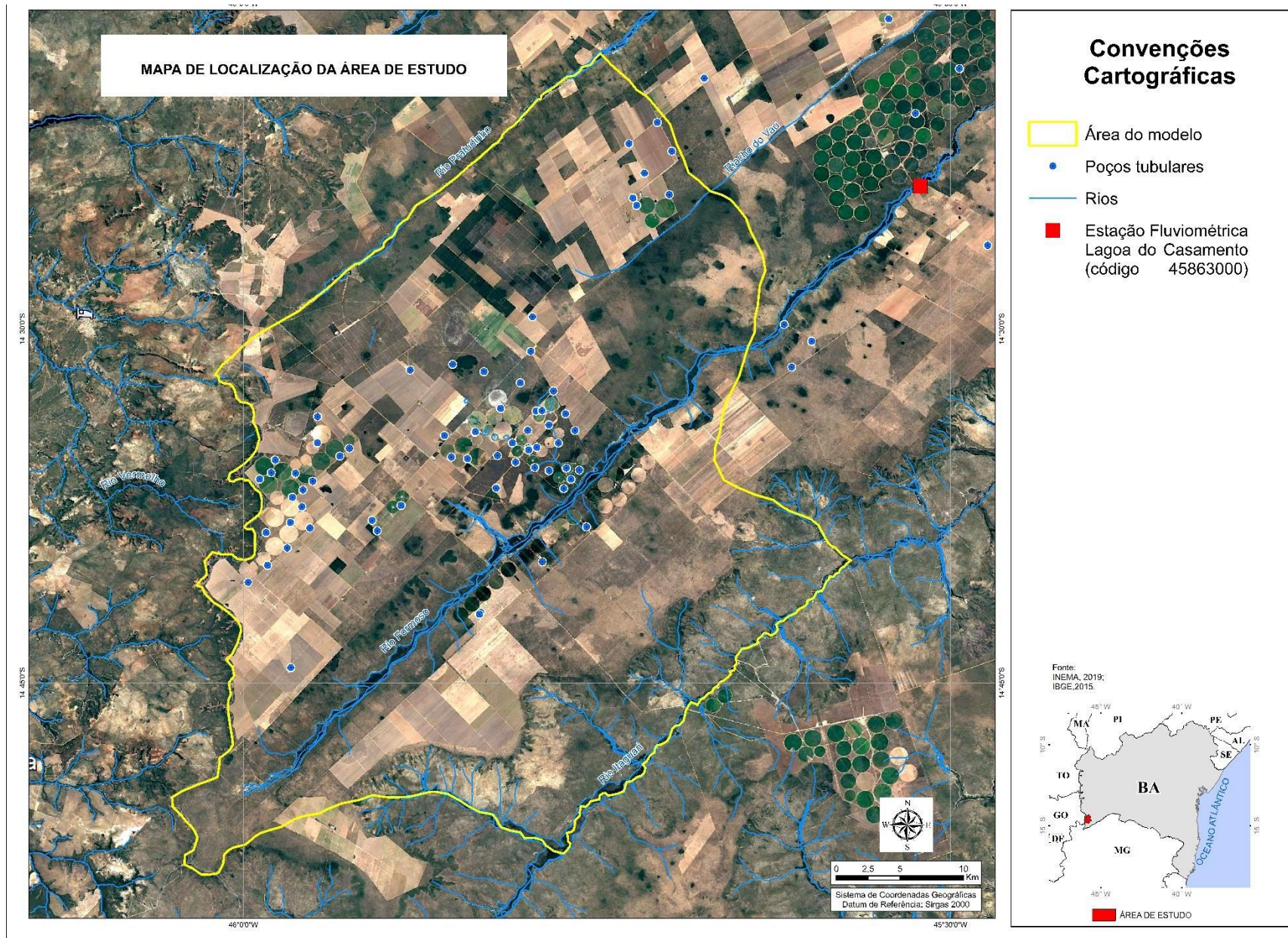
A área estudada situa-se nos limites estaduais da Bahia e de Goiás, nas bordas da escarpa geomorfológica conhecida como Serra Geral. Vale ressaltar que, devido as condições de contorno das modelagens, os limites dessa área podem variar em cada etapa

do estudo (Figura 1), afim de preservar a qualidade dos resultados, como será explanado no capítulo de materiais e métodos.

Essa área está inserida na bacia hidrográfica do rio São Francisco em seu curso médio, na Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA) do rio Corrente, na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) 23.2.4.

Encontra-se entre os municípios de Mambaí no estado de Goiás e os municípios de Jaborandi e Cocos no estado da Bahia. O acesso, partindo da cidade de Luís Eduardo Magalhães, é pela BR-020 na direção sul por 282 km. Em Simolândia, seguir até Mambaí pela GO-108/GO236 por 49,8 km. De Mambaí, seguir pela Rodovia Mambaí-Côcos, por aproximadamente 5 km até a área de estudo.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. A área da modelagem hidrogeológica está delimitada através do polígono amarelo.



CAPITULO II

REGIÃO OESTE DA BAHIA

Um conjunto de características físicas possibilita a rápida expansão do agronegócio na região do Oeste baiano, e, por conseguinte, a super-exploração dos recursos hídricos disponíveis. Sendo assim, antes de se avaliar a gestão das águas, é necessário entender os diversos protagonistas que fazem da região, alvo de discussões e debates. É necessário adequar o avanço do agronegócio aos limites naturais do meio físico. Nesse capítulo, será apresentada a caracterização fisiográfica da área de estudo, bem como discutida sua influência nos mananciais hídricos e na ocupação e conflitos do espaço.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS FISIográfICOS

A área de estudo localiza-se no bioma cerrado, abrigando o tipo de vegetação de savana, na qual predominam plantas gramíneas, com árvores esparsas e arbusto isolados ou agrupados. As árvores possuem caules tortuosos e folhas coriáceas. Ocorre ainda os locais conhecidos como “veredas”, que bordejam os rios, riachos e nascentes. A preservação da cobertura vegetal é essencial para a infiltração do solo, garantindo a recarga do aquífero e melhorias na qualidade da água. No oeste baiano, estima-se que 94% das águas na região hidrográfica do Rio São Francisco são de origem no bioma de cerrado (Lima, 2011).

Já no âmbito geomorfológico, a unidade predominante é o “Chapadão Ocidental do São Francisco” ou Chapadão Ocidental Baiano (SEI, 2006). É nessa unidade que contém a zona de recarga do SAU, por sua forma quase plana combinada com a alta porosidade do solo permitir a infiltração das águas meteóricas. Tem altitudes que chegam a 940 metros. A feição que mais se destaca nessa região é conhecida como Serra Geral de Goiás (Figura 2), a qual delimita os estados da Bahia e de Goiás, apresentando um desnível de até 200 metros (Campos, 1996). Apresenta escarpas abruptas e, nas suas bordas, colúvios resultantes da erosão remontante do Grupo Urucuia. As planícies dos rios são depressões suaves e abrigam as “veredas”.

Figura 2 - Visão da BA 236, com a Serra Geral de Goiás. O relevo plano acima da serra é o Chapadão Ocidental Baiano, formado pelos arenitos neocretáceos do Grupo Urucuia. Coordenadas: X: 0379476 m / Y: 8527553 m.



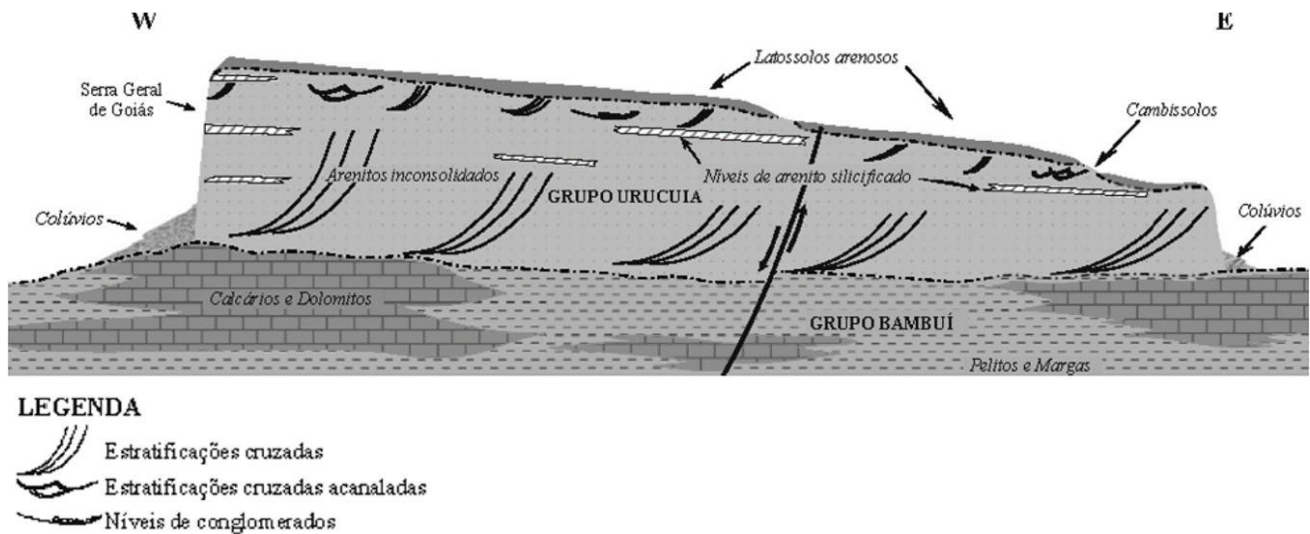
Fonte: Ramos, 2018.

O clima do oeste baiano é classificado como tropical de invernos secos, do tipo A_w , segundo Köppen. Apresenta duas estações bem definidas: verão chuvoso de outubro a abril e um inverno seco de maio a setembro. Em Jaborandi, a temperatura média é de 22.9°C e a pluviosidade média anual é de 1321 mm. Na região, a altura pluviométrica cresce gradualmente de leste para oeste, onde as médias anuais chegam até 1450 mm na borda da Serra Geral de Goiás. Essas áreas que apresentam maiores pluviosidades são também as zonas de recarga do AU.

2.1.1 Geologia

O Sistema Aquífero Urucuia encontra-se no contexto geotectônico da Bacia Sanfranciscana. Esse termo foi proposto por Almeida (1977) e Sgarbi (1989) para denominar a depressão na qual se acumularam as coberturas fanerozóicas sobre o Cráton do São Francisco. Em quase toda a sua extensão o SAU está sobreposto ao conjunto de rochas pelitos-carbonáticas do Grupo Bambuí, o qual constitui o sistema cárstico-fissural Bambuí. Na parte norte, repousa sobre as rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba e também diretamente sobre o embasamento granito-gnáissico, as quais constituem respectivamente os sistemas aquíferos Poti-Piauí/ Serra Grande/ Cabeças e Cristalino (Gaspar, 2007). O contexto geral da geologia do SAU pode ser entendido na figura 3.

Figura 3 - Perfil leste-oeste do contexto geológico do Sistema Aquífero Urucuia, na região oeste da Bahia.



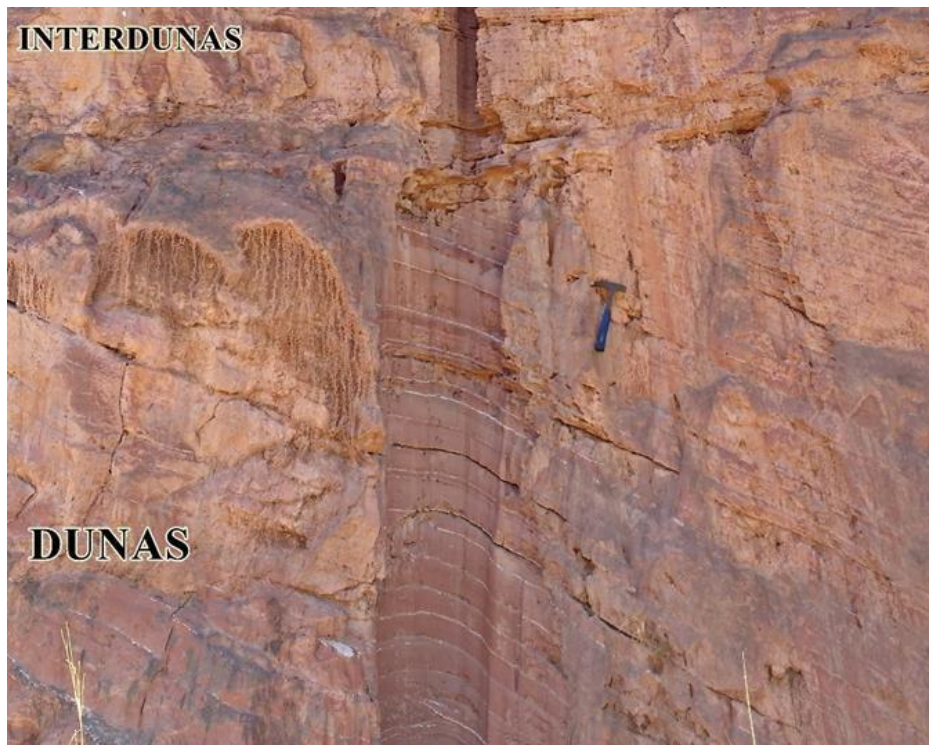
Fonte: Gaspar, 2007.

Em escala local, na área modelada afloram os arenitos do Grupo Urucuia, definido por Campos & Dardenne (1978). Os trabalhos de Campos e Dardenne (1997a) assumiram duas unidades do Grupo, a Formação Posse, unidade basal, e a Formação Serra das Araras, unidade de topo (Figura 4). O processo de sedimentação do Grupo Urucuia pode ser dividido em dois estágios deposicionais: (i) sistema eólico seco, relacionado a Formação Posse e (ii) sistema fluvial entrelaçado, associado a Formação Serra das Araras (Barbosa, 2016).

Representante da unidade inferior do Grupo Urucuia, a Formação Posse caracteriza-se pela sua homogeneidade, constituída de arenitos eólicos, finos a médios, com grãos de quartzo arredondados a sub-arredondados, estratificações cruzadas de grande porte, com intercalações de lentes arenosas e leitos conglomeráticos constituídos por seixos e matacões de arenitos finos, imersos em matriz areno-argilosa.

A entrada de umidade para o continente e, conseqüente interrupção do sistema eólico seco, deu origem a uma superfície erosiva e deposição da Formação Serra das Araras. Constituem-se de arenitos, argilitos e conglomerados avermelhados e amarelados. Em alguns locais, a cimentação por sílica e óxido de ferro é intensa, assemelhando-se a um silexito (Ramos, 2018).

Figura 4 - Arenito com estratificações cruzadas de grande porte associado a Formação Posse do Grupo Urucuia. Afloramento as margens da rodovia GO 236. Coordenadas: 0379476 m, 8527553 m. Altitude 763 metros.



Fonte: Ramos, 2018.

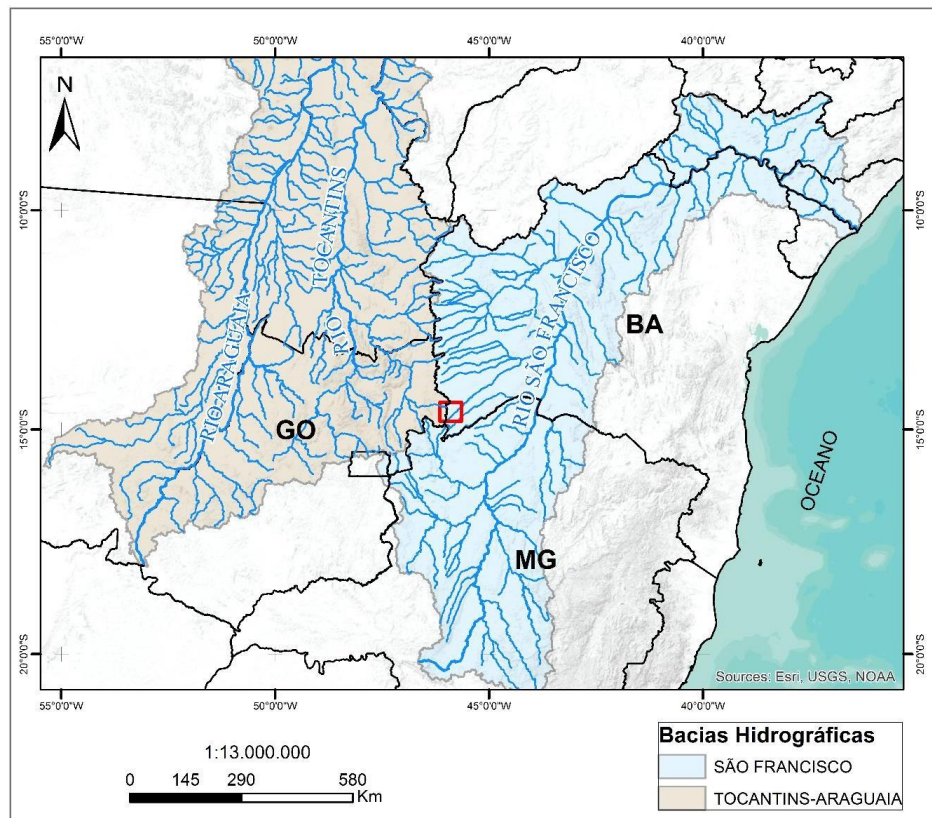
2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

O Oeste da Bahia é reconhecido pela sua elevada potencialidade hídrica, característica que impulsiona o avanço do agronegócio. No âmbito regional, pertence a bacia hidrográfica do rio São Francisco (Figura 5), em seu curso médio. A área de estudo insere-se na Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA) do rio Corrente, na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) 23.2.4.

A drenagem superficial no oeste baiano se faz de oeste para leste com deflúvio total para o rio São Francisco. Na porção leste, encontram-se os rios Pratudinho, Formoso e Itaguari. Já na sua porção oeste, nas bordas da escarpa geomorfológica, ocorrem as nascentes dos afluentes dos rios Tocantins- Araguaia, todas alimentadas pelo SAU. De forma geral, os rios que se encontram nos chapadões apresentam padrão de drenagem semiparalelo, orientados segundo a direção WSW-ENE. Constituem uma expressão de um controle estrutural regional, com rios encaixados segundo orientação das fraturas.

O Sistema Aquífero Urucaia (SAU) é estrategicamente importante pois têm a função de regulador das vazões e responde por cerca de 90% do escoamento de base dos rios que alimentam o médio curso do Rio São Francisco garantindo sua perenidade nos períodos de estiagens (Barbosa, 2019).

Figura 5 - Bacias Hidrográficas do rio São Francisco e dos rios Tocantins-Araguaia, com polígono vermelho destacado a área de estudo.



Fonte: Ramos, 2018.

2.3 OCUPAÇÃO DO ESPAÇO E CONFLITOS PELO USO DAS ÁGUAS

Inicialmente, o processo de ocupação do cerrado brasileiro esteve associado à interiorização da colonização portuguesa. Até o séc. XX, o Oeste da Bahia possuía seus limites territoriais integrados ao Sertão do São Francisco, conhecido como “Além do São Francisco”. (SANTOS et al., 2010).

Já a partir da década de 1980, houve um processo de ocupação diretamente ligado ao apoio e participação do Estado que consolidou o cerrado baiano como a nova fronteira.

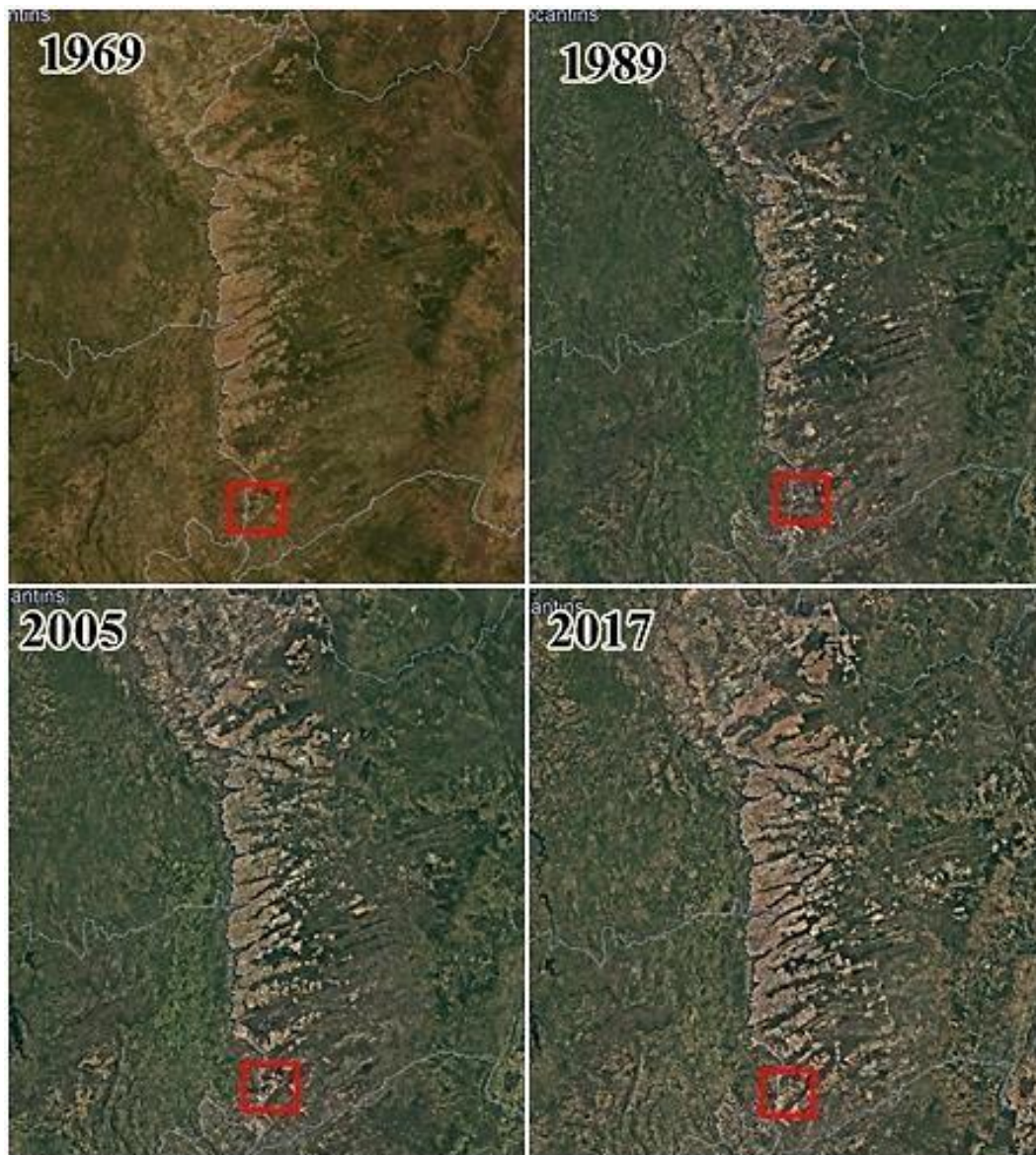
Este espaço foi modelado em função de: (i) disponibilidade de terra barata e em abundância; (ii) topografia propícia à mecanização agrícola; (iii) crédito subsidiado; (iv) introdução de vias de acesso aos centros consumidores, pela implantação da infraestrutura por meio da construção das malhas viárias Br-020 e Br-242, sentido Brasília e Salvador, respectivamente; e (v) apropriações ilícitas de terras associadas às violências contra os antigos ocupantes (SANTOS FILHO, 1989; SANTOS et al., 2010).

Observa-se, portanto, uma acentuação da ocupação do solo ao longo das quatro últimas décadas (Figura 6). De maneira geral, pode-se afirmar que tanto as empresas agrícolas quanto o Estado foram os principais agentes do processo das transformações ocorridas na região (Santos, 2014). Após a chegada da fronteira agrícola, em 1985, as áreas de cobertura natural do cerrado foram convertidas em áreas agrícolas, e, enquanto isso, as áreas dos estabelecimentos de pastagens totais (natural e plantada) perderam espaços para a agricultura intensiva (Santos et al., 2018).

Na figura 6, observa-se que as áreas do extremo oeste baiano vêm apresentando altas taxas de ocupação e desenvolvimento agropecuário, ocasionando diversas alterações no solo e nos rios. É notório que esse avanço se concentra nas zonas de recarga do SAU, em localidades de maiores índices pluviométricos e elevações.

Segundo Barbosa et al. (2019), atualmente, a substituição da vegetação natural a favor de extensas lavouras resulta em alterações significativas no balanço hídrico, com favorecimento ao escoamento superficial e evapotranspiração em detrimento à infiltração. Isso implica na intensificação de processos erosivos que ocasionam assoreamentos, voçorocas e colapsos de solo.

Figura 6 – Evolução da ocupação do solo nas últimas décadas no oeste da Bahia.



Fonte: Ramos, 2018.

Esse advento proporcionou um aumento das áreas irrigadas por pivôs centrais, o que demandam grandes quantidades de água. Por sua vez, com o avanço das demandas, os mananciais hídricos superficiais tiveram sua disponibilidade esgotada (Barbosa, 2016). A captação de águas subterrâneas tornou-se o principal instrumento para continuar com o avanço do agronegócio. Somado a isso, observa-se que as nascentes dos rios localizados no Chapadão Urucuia, migraram progressivamente para leste, devido, possivelmente, a depleção gradual dos níveis potenciométricos do aquífero. É nesse contexto que ocorre o aumento expressivo de conflitos e focos de tensão pelo uso das águas na região oeste da Bahia.

CAPITULO III

GESTÃO E OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS

A gestão de recursos hídricos fundamenta-se em princípios, regras e procedimentos com finalidade de tomar decisões que permitam convergir os interesses dos diversos usuários de água de uma bacia hidrográfica. É baseada em um planejamento integrado, ação conjunta, visto que qualquer ação aplicada em uma parte da bacia hidrográfica tem repercussão nas outras partes. Pondera-se as ações dos diversos agentes e os preceitos da legislação vigente (Reis, 2019). Lautze (2011) define a gestão dos recursos hídricos como sendo o conjunto de mecanismos e medidas traçadas e destinadas a regular o uso, controle e proteção dos recursos hídricos, de acordo com a legislação e normas pertinentes.

3.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS EM GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Historicamente, as águas superficiais e subterrâneas são tratadas como reservatórios distintos na gestão e planejamento. Contudo, a medida em que os estudos hidrológicos avançam, a interação entre os aquíferos e os rios torna-se mais conhecida e, por conseguinte, é necessário considerar essa questão na tomada de decisões.

No cenário internacional, é comum a utilização de modelos analíticos nas agências reguladoras de uso das águas. Nos Estados Unidos, Austrália, Nova Zelândia e países da Europa (BUTLER et al, 2001), as estimativas de depleção do fluxo de base são geralmente obtidas através de modelos, que são ferramentas essenciais na gestão de aquíferos.

Um exemplo interessante de gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos ocorre na região do aquífero “High Plains”, que abrange oito estados americanos, do Texas a Dakota do Sul. Possui uma espessura saturada média de aproximadamente 60 metros, mas pode chegar a mais de 379 metros em Nebraska (Gurdak & Qi, 2006). Corresponde ao aquífero mais usado nos Estados Unidos, fornecendo cerca de 30% do total de retiradas de águas subterrâneas para irrigação (Maupin e Barber, 2005). Nos últimos 50 anos, como consequência do bombeamento dos poços, houve uma depleção significativa nos níveis

potenciométricos do aquífero. Isso ocorreu porque a taxa de bombeamento e retirada de água é superior ao volume de recarga.

Nesse contexto, os conflitos tornaram-se comuns entre os poderes estaduais e federal, tendo em vista que, tal como no Brasil, o gerenciamento das águas subterrâneas são de responsabilidade de cada estado. Sophocleous (2009) apresentou as inovações na gestão de recursos hídricos da região do aquífero “High Plains”. Destaca-se: i) Desenvolvimento do programa “Texas Groundwater Availability Modeling (GAM)”, no qual foram realizadas simulações sobre a disponibilidade hídrica no futuro; ii) Criação de distritos de gestão e regulação de águas subterrâneas, os quais levam em consideração as características locais do aquífero e seus usos, em Kansas.

Sophocleous (2009) conclui que os sistemas de gestão que tratam águas subterrâneas e superficiais de forma integrada e similar, como no Novo México, Colorado e Kansas, estão mais bem equipados para solucionar problemas futuros da interação rio/ aquífero. Já os estados do Texas, Oklahoma e Nebraska, que seguem uma doutrina de “alocação prévia” apenas para águas superficiais, não se mostram suficientes para enfrentar problemas do uso das águas no futuro.

Outra experiência interessante sobre a gestão de recursos hídricos subterrâneos ocorre em Israel. A história da política das águas no país demonstra como o estado muitas vezes pleiteou decisões ou adotou soluções mais caras por causa: i) da confusa gestão das águas, em que diversos ministérios tinham funções específicas; e ii) a forte influência da agricultura na gestão, pois durante muito tempo essa ficou sob responsabilidade do Ministério da cultura. Entretanto, em 2007 foi criada a Autoridade da Água, órgão gestor nacional, além da existência do Mekorot, uma empresa pública responsável pelos projetos de obras hídricas (Monteiro, 2018).

Além da conhecida política de tratamento de efluentes, Israel conta com algumas medidas específicas para a gestão de águas subterrâneas. Um adendo notório é a política de recargas de aquíferos, através de poços de infiltração e utilização do Mar da Galiléia.

3.2 ASPECTOS LEGAIS DA OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS

Segundo a Constituição Federal de 1988, as águas subterrâneas são bens do Estado e cabe, portanto, aos estados a sua gerência. Todavia, quando essas possuem

características físico-químicas específicas são consideradas bens da União e não dos estados, governadas pelos Código das Águas Minerais e Código de Mineração.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, estabelece cinco instrumentos para o gerenciamento dos recursos, são eles: Planos de Recursos Hídricos, Enquadramento de corpos de água em classes, outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, cobrança pelo uso e o Sistema Nacional de Informações sobre os Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Tal lei ratifica ainda que cabe aos estados o dever de regular e fiscalizar o uso de águas subterrâneas.

No estado da Bahia, o órgão gestor responsável é o Instituto de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos (INEMA). A Lei Nº 11.612 de 08 de outubro de 2009 dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), o Sistema Estadual de Gerenciamento de recursos hídricos e dá outras providências para o gerenciamento estadual das águas. Em seu Art. 31, a legislação considera que as águas subterrâneas se submetem aos fundamentos, diretrizes gerais e aos instrumentos da PERH, afim de assegurar sua qualidade e quantidade. Para a efetivação da PERH, inclusive da outorga de direito de recursos hídricos, o INEMA segue as diretrizes da PORTARIA Nº 11.292 de 13 de fevereiro de 2016.

A solicitação de outorga deve ser realizada no SEIA (<http://sistema.seia.ba.gov.br/>), conforme fluxo apresentado na Figura 7. O suporte técnico para requerimento e formação do processo é de responsabilidade do Setor de Atendimento do INEMA (ATEND).

Figura 7 - Fluxo do processo de outorga no INEMA, estado da Bahia.



Fonte: INEMA, 2020.

No caso de captação de recursos hídricos subterrâneos, o requerente deve solicitar inicialmente a Autorização de Perfuração de Poço (APPO), anexando informações como local da perfuração, geologia, potencialidade hídrica esperada e uma declaração da empresa que vai perfurar o poço, a qual deve estar devidamente cadastrada no INEMA. A perfuração do poço deve ser acompanhada de um responsável técnico, com respectiva emissão de ART.

Após isso, é necessário solicitar a outorga que confere o direito de uso das águas. No estado da Bahia, os documentos necessários para análise de processos de outorga para fins de captação subterrânea, de acordo com a Portaria INEMA nº 11.292/16 são:

- a) *Formulário de Caracterização do Empreendimento (FCE);*
- b) *Memorial descritivo do projeto, contendo: justificativa, descrição das demandas hídricas com demonstrativo de cálculo; metodologia e parâmetros usados no cálculo da vazão a ser captada, dados do sistema de recalque e projeto técnico da captação de água;*
- c) *Relatório Técnico, contendo croqui do sistema de captação e distribuição;*
- d) *Autorização para Perfuração de Poço ou Declaração de Conformidade de Poço (para os poços perfurados antes de 08/10/2009);*
- e) *Relatório técnico de hidrogeologia e físico-química local;*
- f) *Teste de bombeamento e perfil litológico e construtivo do poço*

A análise para o parecer técnico considera a demanda calculada de acordo com a finalidade do uso (abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação, etc.); a localização da captação; características da captação; vazão solicitada; teste de bombeamento e perfil litológico e construtivo do poço. A disponibilidade hídrica é avaliada com base no ensaio de bombeamento de cada poço, observando que a vazão outorgada não pode ser maior do que a vazão do poço obtida com o nível estático. Além disso, a vazão da bomba que deve ser menor ou igual a vazão do teste de bombeamento, e da análise da demanda do usuário (INEMA, 2020).

Já no estado de Pernambuco, o procedimento para outorga de captação subterrânea envolve as seguintes etapas: i) requerimento com informações das vazões pretendidas, coordenadas e finalidade de uso da água; ii) ficha de cadastro de poço, com os dados relativo a profundidade, níveis, diâmetro, etc. iii) manutenção anual do poço; iv) teste de bombeamento; v) análise físico-química da água e, por fim, vi) documentação complementar de titularidade do requerente.

Observa-se que na maioria dos estados brasileiros a análise do processo de outorga de captação subterrânea, diferente dos outros casos (i.e. lançamento de efluentes, captação superficial, etc.), não tem sistemas de suporte a decisão. Além disso, modelos analíticos não são utilizados como ferramentas para a avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea. O parecer técnico do órgão gestor é dado através de uma análise documental e de atendimento a critérios regionais da legislação.

3.3 CRITÉRIOS ESTADUAIS PARA OUTORGA NO SAU

A evolução no conhecimento hidrogeológico do SAU e a pressão social no uso de águas subterrâneas, acarretou no estabelecimento de normas e limites para a sua exploração no oeste da Bahia. Foram definidos valores de vazões máximas permitidas e distâncias entre poços e entre poços e corpos de águas superficiais após estudos realizados na bacia hidrográfica do Rio das Fêmeas por Maia e Rodrigues (2012) e posteriormente publicados na forma de uma Instrução Normativa nº15, de 18 de março de 2010. Destacam-se os seguintes critérios para emissão de outorga:

Distância mínima:

a) Entre poços tubulares:

I – Poços com vazão menor que 30 m³/h: 600 m;

II – Poços com vazão maior ou igual a 30 m³/h e menor que 100 m³/h: 1000 m;

III – Poços com vazão maior ou igual a 100 m³/h e menor que 200 m³/h: 1500 m;

IV – Poços com vazão maior ou igual a 200 m³/h e menor que 300 m³/h: 2000 m;

VI – Poços com vazão maior ou igual a 300 m³/h e menor ou igual a 500 m³/h: 2500 m.

b) Entre poços tubulares e corpos hídricos superficiais:

I - Poços com vazão menor que 20 m³/h: 500 m;

II - Poços com vazão maior que 20 m³/h: 2.500 m.

c) A capacidade de exploração das águas subterrâneas no aquífero Urucuia fica limitada a uma vazão máxima instantânea de 360.000 m³/h.

Atualmente, apesar da normativa ser utilizada na emissão de novas outorgas, ela continua sendo alvo de divergência entre os diferentes usuários e o órgão gestor. Alguns usuários alegam que essa interferência entre os poços na prática não acontece. Outros apontam que a instrução normativa ainda não é suficiente, tendo em vista a depleção das vazões dos rios.

Alguns inconvenientes são notórios, como não considerar a vazão de bombeamento ao longo dos anos na expansão do cone de rebaixamento, efeitos do bombeamento de baterias de poços e, além disso, a influência do bombeamento dos poços nos rios permanece não sendo avaliada. Nesse caso, os modelos matemáticos apresentam-se como uma ferramenta indispensável ao apoio na tomada de decisões para o planejamento dos recursos hídricos.

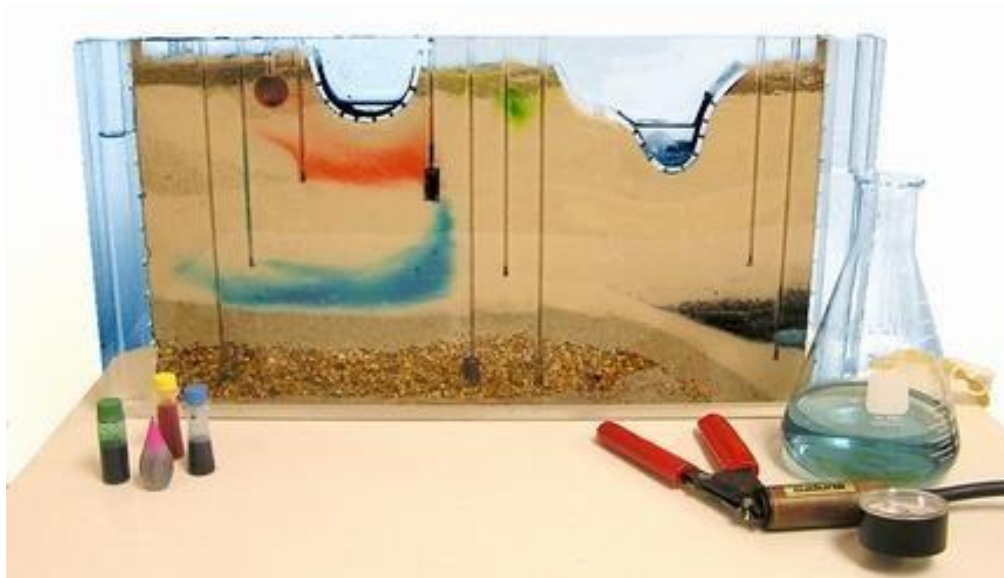
3.4 MODELAGEM APLICADA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A modelagem matemática sempre foi utilizada para representar os diversos sistemas naturais. A concepção da modelagem advém da representação de um sistema físico por meio de equações, ou seja, a representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo interrelaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (Tucci, 1987). Na hidrologia subterrânea e superficial, os modelos aplicados geralmente se enquadram em três categorias principais: conceituais, físicos e matemáticos (WHEATHER et al. 1993). Cada modelo possui diferentes configurações, tanto em requisitos de dados e custos operacionais, como na saída das informações e no detalhamento da representação dos processos físicos.

Um modelo conceitual pode ser descrito como uma ideia básica ou a explicação de como um sistema atua (BREDEHOEFT, 2004). Na hidrogeologia, o modelo conceitual de um sistema aquífero deve conter informações como a estrutura geológica, tipos e

características dos aquíferos, locais de recarga e descarga e direção de fluxo subterrâneo. Já os modelos físicos, são representações laboratoriais, geralmente em escalas reduzidas (Figura 8).

Figura 8 – Exemplo de modelo físico hidrogeológico.



Fonte: <https://dep.wv.gov/WWE/getinvolved/WET/Pages/models.aspx>

Os modelos matemáticos são numéricos ou analíticos. Os modelos analíticos são utilizados para descrever o comportamento entre as variáveis com base nos dados observados isoladamente. Muitas vezes, a relação entre variáveis adotada é descrita com uma função matemática simples (WHEATER et al. 1993).

Os modelos numéricos operam através da resolução de equações matemáticas que descrevem princípios físicos fundamentais. Estes modelos muitas vezes aplicam uma modelagem distribuída por um sistema discretizado, com um grande número de elementos ou de quadrículas nos quais as previsões são distribuídas no espaço (BEVEN, 2000a).

Cabe ressaltar que os modelos numéricos e analíticos dependem da interpretação da física de um sistema. Nesse tipo de modelagem, os parâmetros mensurados em uma determinada área, através de medições geralmente são aplicados em grandes áreas. Nos estudos sobre o Sistema Aquífero Urucua isso é comum, tendo em vista a concentração de informações em pequenas áreas.

O MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) é um modelo numérico amplamente utilizado na modelagem de sistemas hidrogeológicos e resolve a equação diferencial de fluxo de águas subterrâneas em três dimensões, através do método de diferenças finitas (MDF).

Na área estudada, observa-se que todas as modelagens realizadas tinham como finalidade subsidiar a tomada de decisão no processo de outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos. Exemplo de estudos são Schuster (2002); Schuster (2003); e, BAHIA (2003).

Rodrigues (2013) abordou a conectividade entre águas subterrâneas e superficiais, na bacia do rio Grande, sub-bacias do rio de Janeiro e das Fêmeas, na área de abrangência do SAU. Demonstrou que para atender os pressupostos de uma gestão integrada de recursos hídricos, a modelagem analítica pode atender a tomada de decisão, dando respostas rápidas e eficazes. Conclui-se ainda que o fato dos modelos analíticos superestimarem a depleção é outra grande vantagem, pois concede segurança para os gestores, minimizando as possibilidades de conflitos ou de crises de abastecimento. Além disso, esta margem de segurança também minimiza os riscos resultantes de explorações de longo prazo que tendem a rebaixar o nível regional de um aquífero (Rodrigues, 2013).

Oliveira et al. (2019) fez uma análise dos efeitos da extração de águas subterrâneas por poços no Sistema Aquífero Urucuia. O método utilizado foi a simulação de fluxo hídrico subterrâneo em regime estacionário para três cenários: i) sem bombeio; ii) com bombeio atual e; iii) com 60% a mais de extração por poços. Os modelos estacionários sem bombeio e com bombeio mostram que, a longo prazo, o armazenamento de água subterrânea diminui em 2 km³ (rebaixamento médio no aquífero de 0.8 m) sem interferências na direção de fluxo regional. O balanço de massa mostrou que o fluxo de base dos rios principais é reduzido em aproximadamente 6% após a extração de água subterrânea atual e mais 2,5% após acréscimo de extração. Esses estudos indicam a importância de manter e expandir a rede de monitoramento dos níveis d'água.

CAPITULO IV

POTENCIALIDADE HÍDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

Inicialmente a exploração dos recursos hídricos na região do Oeste, não se tinham informações e estudos sobre a conexão hidráulica do aquífero Urucuia com outros aquíferos, como o cárstico Bambuí, e com os rios. Entretanto, já nos primeiros poços perfuradas a grandes profundidades, revelou-se o grande potencial hídrico da região.

Até o final da década de 1990, mesmo com uma grande evolução na paisagem local, com implantação de importantes áreas voltadas as atividades agrícolas a totalidade dos estudos se concentravam nos aspectos geológicos, a exemplo de Campos e Dardenne (1994, 1997a, 1997b, 1999). No início e meados dos anos 2000, com o aumento da procura pelos recursos hídricos subterrâneos e a perfuração de poços tubulares profundos, importantes modificações hidroambientais e conflitos pelo uso da água foram verificados, fato que acarretou no desenvolvimento de estudos pilotos. Tais estudos buscaram obter informações técnicas e hidrogeológicas que servissem de base para a emissão de outorgas e com isso racionalizar o uso da água para irrigação. Esses estudos apresentam informações sobre a qualidade de água, hidrogeologia e estudos hidrológicos (e.g., Aquino et al. 2002; Aquino et al. 2003, Amorim Junior 2003, Santana et al.2002, Silva et al. 2002, Shuster et al. 2002, Ramos & Silva 2002; Lima 2000; Bonfim e Gomes 1994; Amorim Junior e Lima 2004; Tschiedel 2004; Campos et al., 2006;).

Os estudos mais recentes destacam-se por apresentarem métodos inovadores e por serem estudos de caráter regional, direcionados ao gerenciamento dos recursos hídricos. Destacam-se ANA 2017, ANA 2018, Gonçalves et al. 2018, Oliveira et al. 2019, Pousa 2019 e Montovani et al. 2019.

Dentre as pesquisas de grande relevância a temática proposta, destaca-se ainda Gaspar (2006) que propôs a denominação de Sistema Aquífero Urucuia (SAU) e o subdividiu em quatro tipos: aquífero livre regional, aquífero suspenso local, aquífero confinado ou semiconfinado e aquífero livre profundo. Na área de estudo, pode-se esperar que o aquífero Urucuia comporte-se localmente como sendo do subtipo aquífero livre regional. Ainda nesse estudo, Gaspar (2006) considera que a reserva passível de ser explorada é a reserva reguladora mais um percentual da reserva permanente. O volume

hídrico passível de ser explotado sem causar prejuízos ao manancial e que garante a disponibilidade sustentável (safe yield), é de:

$$R_{exp} = R_r + \% \cdot R_p$$

$$R_{exp} = 4,0778 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$$

Além disso, Gaspar (2006) elaborou propostas e medidas para a melhoria do sistema de gestão das águas do SAU, como por exemplo, a implantação de um sistema de monitoramento sazonal dos níveis estáticos em poços tubulares e implantação efetiva da outorga para todos os poços instalados no aquífero. Já Barbosa (2016), realizou uma abordagem holística, integrando os parâmetros hidráulicos, hidroquímicos, estratigráficos, geofísicos, isotópicos e análise de dados construtivos em um âmbito regional de maneira a desenvolver um modelo hidrogeológico conceitual do SAU.

Ambos os trabalhos (Gaspar, 2006; Barbosa 2016) possuem caráter regional e demonstram valores das propriedades hidrodinâmicas (e.g. transmissividade e condutividade hidráulica do aquífero) na mesma ordem, quando comparados se utilizando uma mesma escala e em locais semelhantes. Enquanto um reitera o uso do termo Sistema Aquífero Urucuaia, o outro contempla como as diferentes escalas de trabalho influenciam na abordagem do termo “aquífero” ou “sistema aquífero”.

Recentemente, um estudo da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), calculou as reservas do SAU afim de nortear a gestão integrada das águas. Foram utilizados os conceitos apresentados abaixo na Figura 9. Observa-se que o cálculo da Reserva Permanente foi realizado através do método:

$$R = A \times E \times \emptyset_e = V \cdot \emptyset_e$$

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

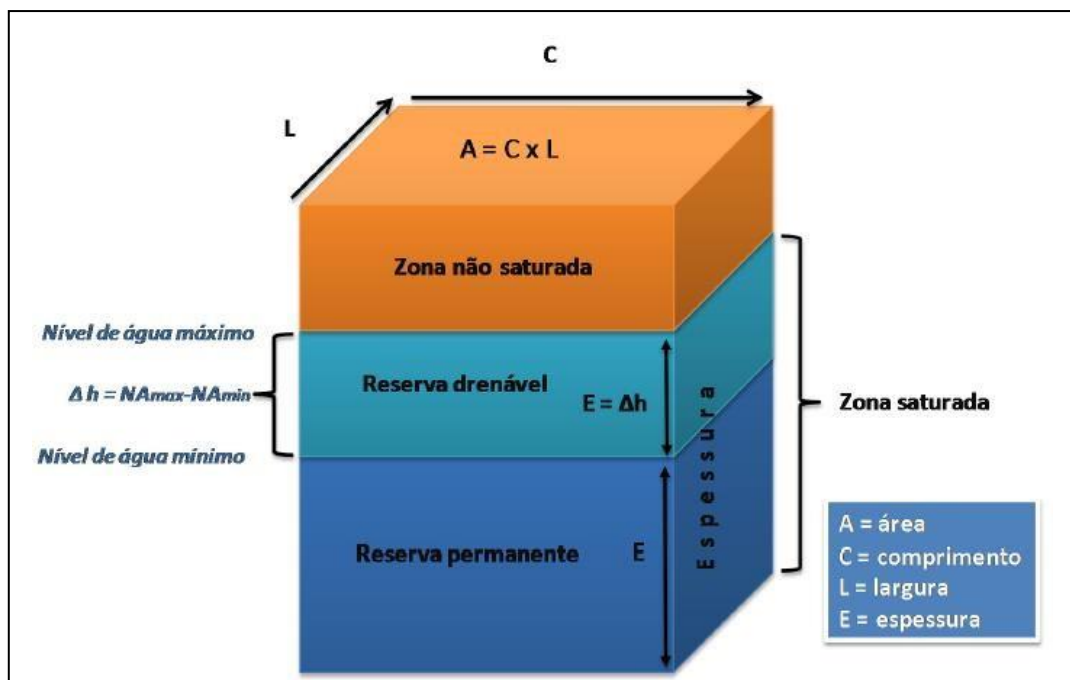
Com relação as disponibilidades hídricas, cabe ressaltar que os conceitos envolvidos são motivo de controvérsia na literatura. Porém, a ANA adota propõe uma visão mais sustentável e integrada, tornando-se mais conservadora. A disponibilidade hídrica total é, dessa forma, um percentual da reserva potencial direta (RPD). Esse percentual é denominado de Coeficiente de Sustentabilidade.

Tem-se, portanto:

$$RPE = Cs \cdot RPD$$

Onde RPE é a Reserva Potencial Explotável.

Figura 9 - Conceitos utilizados para cálculo de disponibilidade hídrica subterrânea do SAU.



Fonte: ANA, 2017.

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

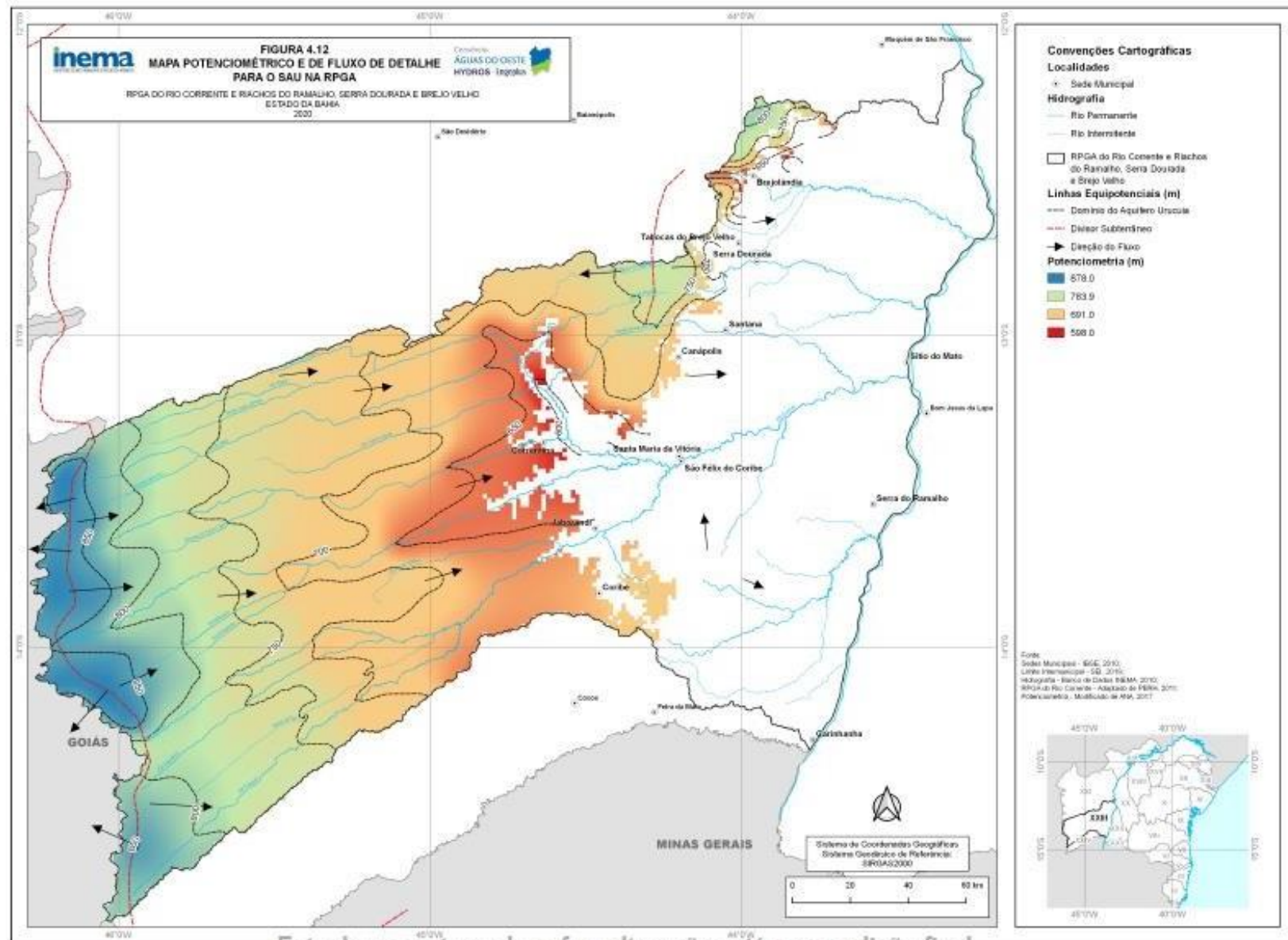
Para o Sistema Aquífero Urucuaia, portanto, adotou-se nesse estudo o C_s de 0,2, baseando-se numa relação Q_{90}/Q_{50} média ponderada pelas do SAU de 0,76, obtida dos seis postos fluviométricos avaliados na hidrologia. Assim, o valor da Reserva Potencial Explotável correspondente à disponibilidade hídrica subterrânea total do SAU, segundo o método utilizado em ANA (2013) é de 4,84 Km^3/ano . O valor obtido da Reserva Potencial Explotável (4,84 Km^3/ano) é aquele que a ANA recomenda que seja efetivamente considerado como a quantidade de água subterrânea disponível para uso no SAU, considerando como adequado o coeficiente de sustentabilidade de 0,2. Desse valor deve-se diminuir o montante referente aos usos atuais.

Para se elaborar o modelo conceitual do presente estudo, foi feita uma compilação de dados e interpretações realizada pelos autores supracitados, destacando-se Ramos (2018) e Góes (2018). Esse é um estudo de caráter local, nos limites da escarpa geomorfológica, divisa entre os estados da Bahia e de Goiás. Foram realizadas análises de testes de bombeamento, obtendo-se valores dos parâmetros hidrodinâmicos e hidráulicos dentro dos intervalos sugeridos por Gaspar (2006) e Barbosa (2016). Além disso, foram feitas análises e interpretações de geofísica, dados construtivos de poços, sedimentológicas, químicas e isotópicas. Seus resultados serão amplamente utilizados para fundamentar os modelos elaborados nessa pesquisa e serão explanados detalhadamente no capítulo de materiais e métodos.

Na bacia hidrográfica do rio Corrente, o aquífero pode alcançar potenciometria de até 900 metros, com fluxo geral para leste. No extremo oeste, assim como nas demais bacias hidrográficas, ocorre o divisor de águas subterrâneas de direção aproximada N-S (Figura 10). Observa-se ainda que os limites da bacia hidrográfica não correspondem com o limite da bacia hidrogeológica. Numa gestão integrada de águas subterrâneas e superficiais, isso pode se tornar um problema, tendo em vista que a unidade de gestão adotada no Brasil é a própria bacia hidrográfica. Apesar dos recursos hídricos subterrâneos do SAU serem gerenciados pelo órgão estadual (INEMA), parte de seu fluxo no extremo oeste deriva para os estados de Goiás e Tocantins.

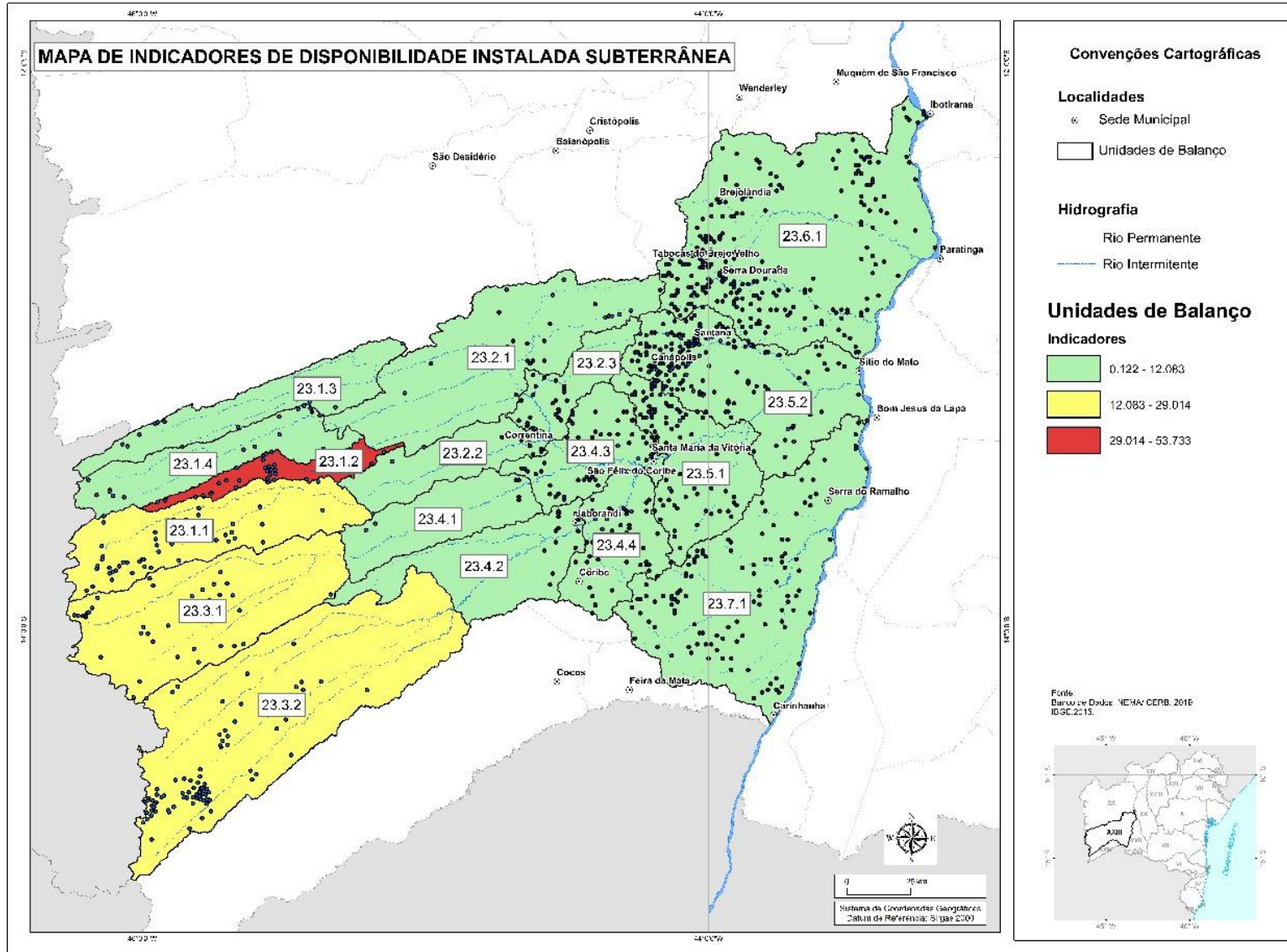
A disponibilidade instalada (FEITOSA, F.A.C; MANOEL FILHO, J., 2000) é definida como a descarga possível de ser obtida a partir das captações existentes no aquífero em estudo, considerando-se o bombeamento em regime contínuo. A partir dos dados de poços tubulares instalados, disponibilizados pelo INEMA e pela CERB, foi elaborado um mapa de indicadores de disponibilidade instalada para a bacia do rio Corrente (Figura 11). O indicador é um número adimensional calculado através da relação entre a disponibilidade instalada e a área de cada unidade de balanço. É nítido que os poços localizados na porção leste da bacia hidrográfica nos aquíferos cársticos e cristalino, apesar de serem numerosos, possuem baixas vazões e a sua grande maioria tem finalidade de uso para abastecimento humano. Enquanto isso, concentram-se no Sistema Aquífero Urucua as maiores disponibilidades instaladas na bacia.

Figura 10 – Mapa potenciometrico da Bacia Hidrográfica do rio Corrente.



Fonte: Comitê da RPGA do Rio Corrente e Riachos do Ramalho, Serra Dourada e Brejo Velho-BA, 2020.

Figura 11 - Mapa de indicadores de disponibilidade instalada subterrânea na BH do rio Corrente.



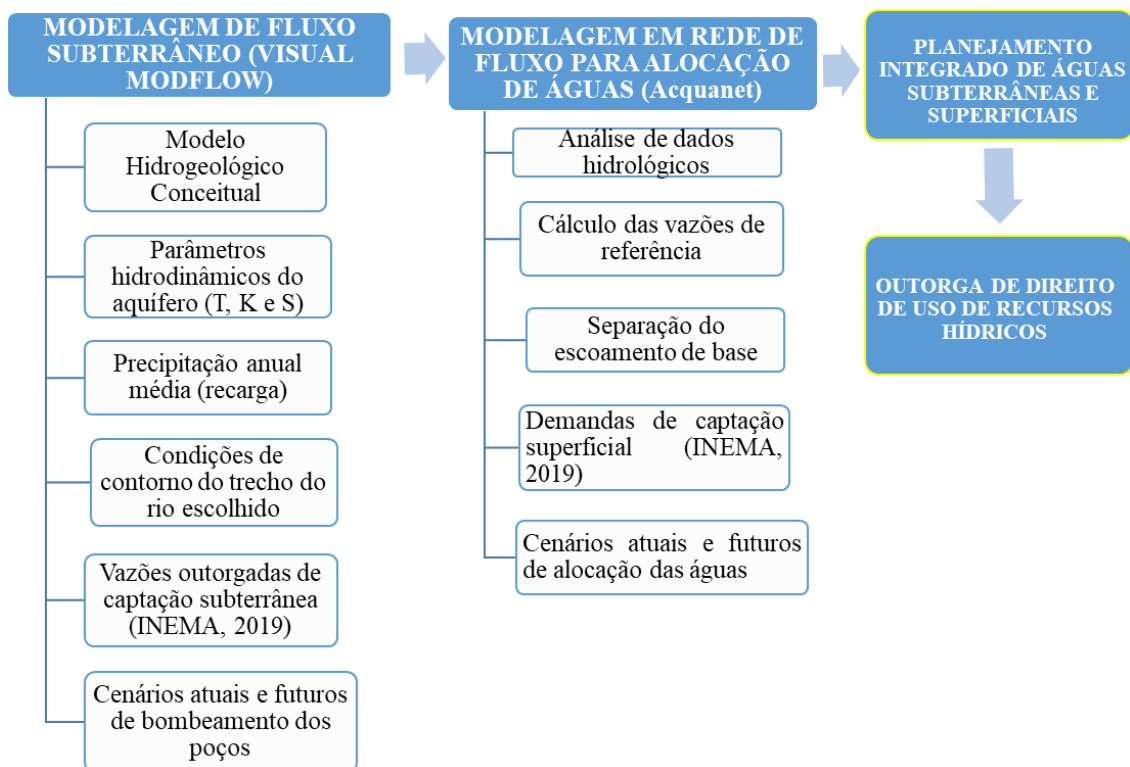
Fonte: Autoral.

CAPITULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizados dados e informações já obtidas em trabalhos anteriores. Estão disponíveis dados sobre a geometria do aquífero e do fluxo subterrâneo local e regional, testes de bombeamento e de aquíferos, análises isotópicas e da qualidade das águas subterrâneas e superficiais do entorno. A modelagem do fluxo subterrâneo foi realizada através do software Visual MODFLOW Classic. Dados de saída dessas simulações, como a contribuição aquífero/rio e a reserva hídrica subterrânea foram inseridos no modelo Acquanet em sua versão 2013 (Labsid), integrando com dados de vazão das águas superficiais e os seus diversos usos. Foram elaboradas simulações de cenários, de forma a contribuir para o planejamento integrado dos recursos hídricos. A partir dos resultados foram apresentadas sugestões de diretrizes a serem adotadas na emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos, bem como a avaliação do uso de modelagem no processo.

Figura 12 – Esquema do método utilizado na pesquisa.



Fonte Autoral.

5.1 MODELAGEM DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A elaboração de um modelo consiste na representação simplificada de um determinado sistema, nesse caso, o sistema aquífero. O método utilizado para avaliação do efeito da exploração do aquífero foi a modelagem matemática do fluxo das águas subterrâneas com o software Visual MODFLOW Classic. O MODFLOW é um modelo de fluxo de água subterrânea de diferenças-finitas, que permite simular o escoamento em sistemas uni, bi e tridimensionais, em aquíferos confinados e não confinados, em regime de fluxo transitório ou permanente. No MODFLOW, o domínio do estudo está dividido numa malha centrada no centro das células nos pontos chamados nós, na qual tem as propriedades hidráulicas do aquífero (Cruz, 2003).

O primeiro passo para a construção do modelo computacional é a caracterização de um modelo conceitual do sistema aquífero. Nessa etapa, são definidas quantas camadas geológicas compõem o modelo e quais são suas propriedades, como transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. Além disso, deve-se estimar a recarga do aquífero, a partir de seu coeficiente de infiltração e precipitação média anual. São necessários também os arquivos e metadados para inserção no *software*, que são: topografia (fornecida o modelo em formato de pontos espaçados de acordo com o tamanho das células escolhidas); poços tubulares (com informações sobre nível estático, nível dinâmico, vazão de bombeamento e coordenadas); *shapefiles* diversos (rios, limites espaciais, etc); e, por fim, a ortofotografia. Ainda nessa etapa, deve-se delimitar as condições de contorno do modelo.

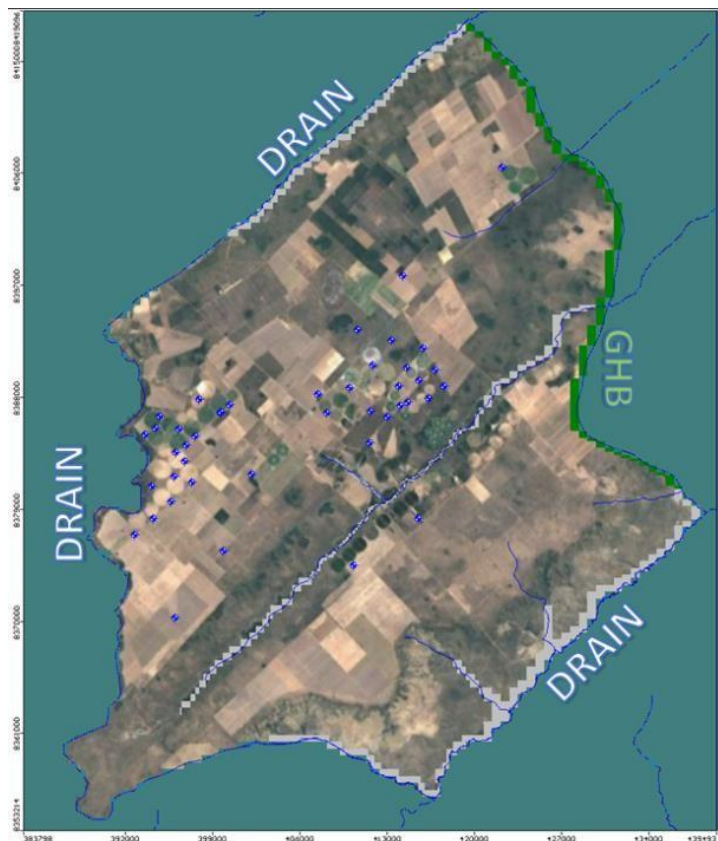
Os parâmetros supracitados são inseridos inicialmente no modelo e, no caso da transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, podem ser reajustados a depender da calibração, como será descrito adiante.

Para elaboração do modelo conceitual, foram utilizados dados hidrodinâmicos e de recarga do aquífero presentes na literatura especializada (Ramos, 2018; Góes, 2018; Gaspar, 2006; Barbosa, 2016). Afim de se obter um melhor detalhamento vertical, foram assumidas 6 camadas associadas ao Grupo Urucuia e 2 camadas subjacentes representando o substrato (Grupo Bambuí).

As condições de contorno (Figura 13) foram delimitadas após a análise do contexto hidráulico da área de estudo. Os rios, por se comportarem de forma perene devido ao fluxo de base do aquífero foram representados através da condição do tipo 3

(contorno com fluxo dependente da carga), do módulo “DRAIN”. Esse módulo foi projetado para simular os efeitos de um dreno, que remove água do aquífero a uma taxa proporcional à diferença entre a carga do aquífero e uma elevação fixa ou do relevo. Os rios Itaguari e o Pratudinho demarcam o limite inferior e superior, respectivamente, da área do modelo. Por se tratar de um “sumidouro” do fluxo de água subterrânea, a escarpa geomorfológica também foi considerada como uma condição do tipo “DRAIN”, limitando a zona oeste da área de estudo e representando as contribuições das nascentes dos rios afluentes da bacia Tocantins-Araguaia. A condição de contorno utilizada para delimitar a zona leste da área foi também do tipo 3, porém do módulo “General Head Boundary” (GHB). A condição de contorno GHB é similar ao DRAIN, mas é utilizada para controlar o fluxo de entrada ou saída de água através de uma carga conhecida, evitando, dessa forma, estender desnecessariamente a área do modelo. Na área de estudo, foi traçada através de uma linha equipotencial de 760 metros, obtida através do trabalho de Barbosa (2016).

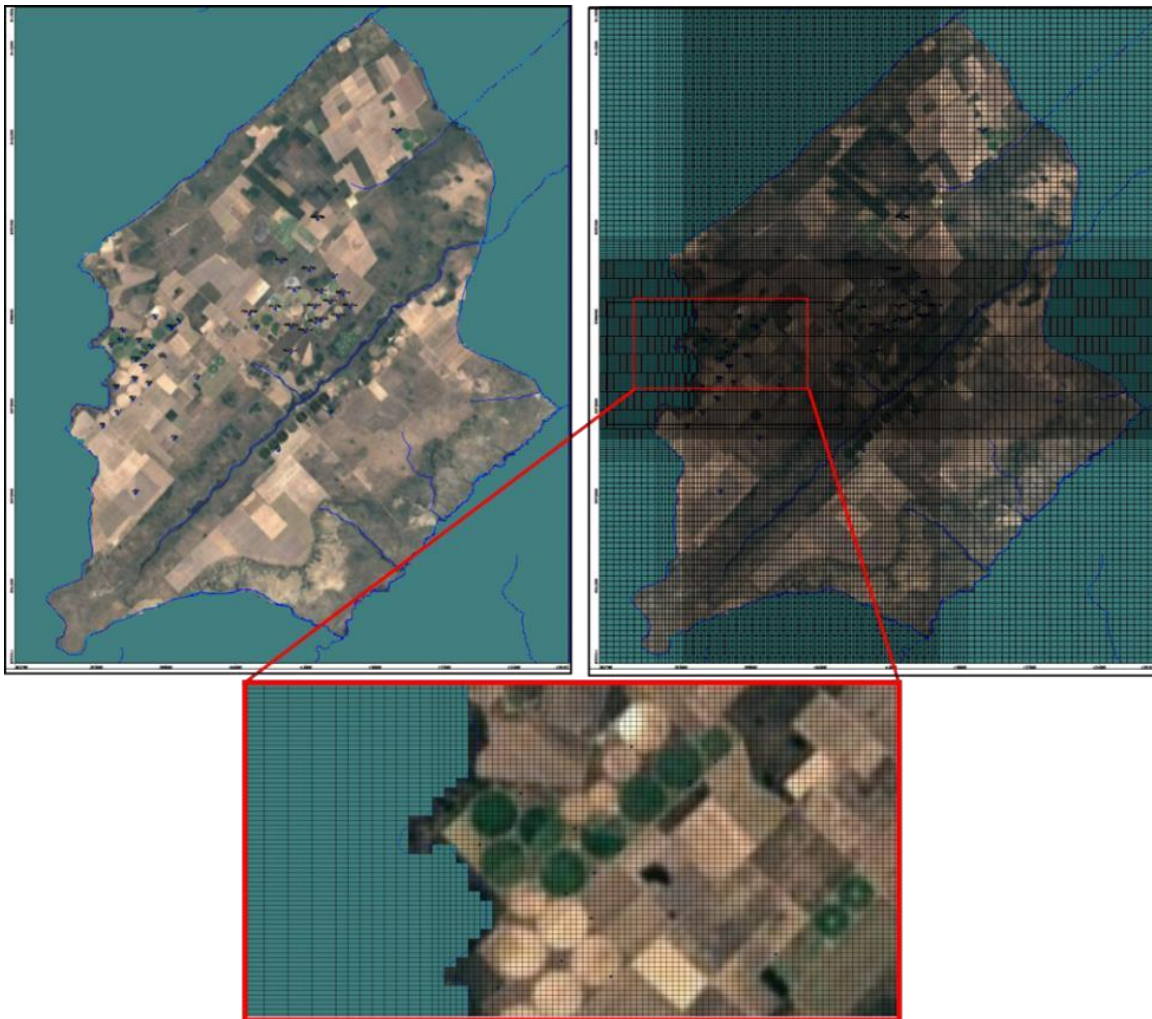
Figura 13 - Área do modelo delimitada através das condições de contorno “DRAIN” e “GHB”. As células verdes representam a área inativa do modelo, onde o fluxo de águas subterrâneas é zero.



Fonte: Autoral.

A área do modelo para o estudo de caso está representada por uma malha de 227 linhas e 199 colunas (Figura 14), com refinamento na área de interesse (bateria de poços), de forma a obter o detalhamento mínimo necessário ao objetivo proposto. Na zona da malha refinada, há um espaçamento de 174 metros na horizontal e 137 metros na vertical.

Figura 14 - - Malha utilizada na modelagem hidrogeológica.



Fonte: Autoral.

Os dados dos poços de observação ou “Head Observation” foram obtidos através de um levantamento no SIAGAS, plataforma desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM); no sistema de informações do Instituto do Meio Ambiente e de Recursos Hídricos do estado da Bahia (INEMA); e, por fim, do cadastramento realizado em campo.

Após a inserção dos parâmetros, foi feita a calibração do modelo, afim de se estimar os erros. Nessa etapa, o software compara o nível estático real informado de cada poço ao nível estático calculado pelo modelo, num cenário em que os poços não estão bombeando e o modelo é estacionário. De uma forma geral, a calibração compara as cargas hidráulicas observadas e calculadas. A calibração foi feita de forma manual e através do PEST, obtendo-se resultados similares. PEST é uma ferramenta de software independente de estimativa de parâmetros e análise de incertezas que tem sido utilizada em vários programas de simulação de águas subterrâneas. Apesar do coeficiente de correlação de 0.816, a curva de calibração foi considerada aceitável, tendo em vista a diversidade temporal dos dados de níveis estáticos. Por terem sido medidos em diferentes anos, ocorre interferência entre os poços.

Após a calibração, os parâmetros hidrodinâmicos finais assumidos na modelagem foram na ordem de 10^{-5} para o Grupo Urucuia e de 10^{-7} para o Grupo Bambuí. Tais parâmetros foram definidos em três regiões distintas, o Grupo Bambuí (2 últimas camadas), a região oeste e leste do Grupo Urucuia (6 primeiras camadas). Os valores da condutividade assumidos após a calibração encontram-se na tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 01 – Condutividade hidráulica das camadas nos eixos X, Y e Z.

Zona	Kx	Ky	Kz
Urucuia - Oeste	$8,21247 \cdot 10^{-5}$	$8,21247 \cdot 10^{-5}$	$1,7985 \cdot 10^{-5}$
Urucuia - Leste	$5,9913 \cdot 10^{-7}$	$5,9913 \cdot 10^{-7}$	$1,3314 \cdot 10^{-7}$
Bambuí	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Após a etapa de calibração, pode-se criar os diversos cenários, a depender do objetivo proposto. Sendo assim, os parâmetros encontrados foram inseridos num modelo de regime transiente, no qual as cargas variam ao longo do tempo. O cenário representado foi o atual regime de bombeamento dos poços no oeste baiano. Segundo a instrução normativa nº 15 do INEMA, o máximo permitido de um bombeamento é de 18 horas por dia. As vazões outorgadas pelo órgão gestor estadual foram inseridas no modelo, admitindo-se um bombeamento de 18h/dia durante um período de 100 anos. Cabe ressaltar que nem todos os poços tinham informações sobre a taxa de bombeamento diária e, por isso, optou-se por simular um cenário pessimista, de máxima exploração.

5.2 MODELO DE FLUXO EM REDES PARA ALOCAÇÃO DE ÁGUA

Para representar os recursos hídricos superficiais e suas demandas, elaborou-se um modelo de fluxo em redes. O software utilizado foi o Acquanet 3.16 (versão antiga), desenvolvido pelo LabSid da Escola Politécnica da USP. O AcquaNet é um modelo de rede de fluxo para simulação de bacias hidrográficas. Com ele, o usuário pode montar redes com um grande número de reservatórios, demandas, trechos de canais, representando o problema em estudo de forma bastante detalhada. Pode-se efetuar os cálculos de maneira sequencial no tempo (Simulação Contínua) ou estatisticamente (Planejamento Tático). Nesse estudo utilizou-se a Simulação Contínua, na qual o valor mais importante é o número total de anos de simulação. O usuário deve fornecer séries de vazões afluentes mensais. O modelo irá efetuar os cálculos continuamente, para todos os anos existentes (Porto, 2002). Apesar de ter sido elaborado para alocação de água em reservatórios, através de alguns artifícios também é possível representar o sistema hídrico de um trecho de rio.

O método seguido para o desenvolvimento do modelo de fluxo em redes está representado no fluxograma da Figura 15. Inicialmente, foi escolhida a estação fluviométrica de código 45863000 (Lagoa do Casamento) por apresentar os dados hidrológicos necessários, como cota e vazão e ter menos falhas que as demais. Essa estação fica a jusante da área do modelo hidrogeológico (Figura 16).

O levantamento de dados hidrológicos foi realizado através do portal Hidroweb, que é uma rede de monitoramento da Agência Nacional de Águas (ANA). Por se tratar de um modelo apenas representativo para avaliar o seu uso como ferramenta de outorga, o período escolhido para a análise foi de apenas três anos (2009 a 2012). As demais estações fluviométricas e períodos próximos a área de estudo foram descartadas por apresentarem alto índice de falhas nas medições.

Figura 15 - Fluxo esquemático do método utilizado para a modelagem de avaliação de demandas hídricas.

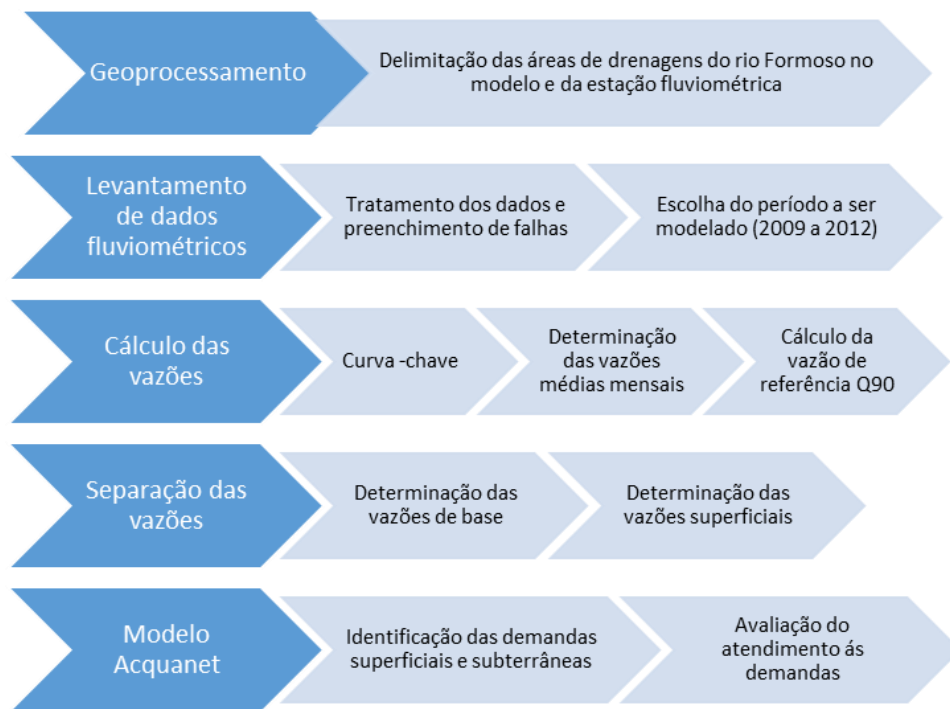
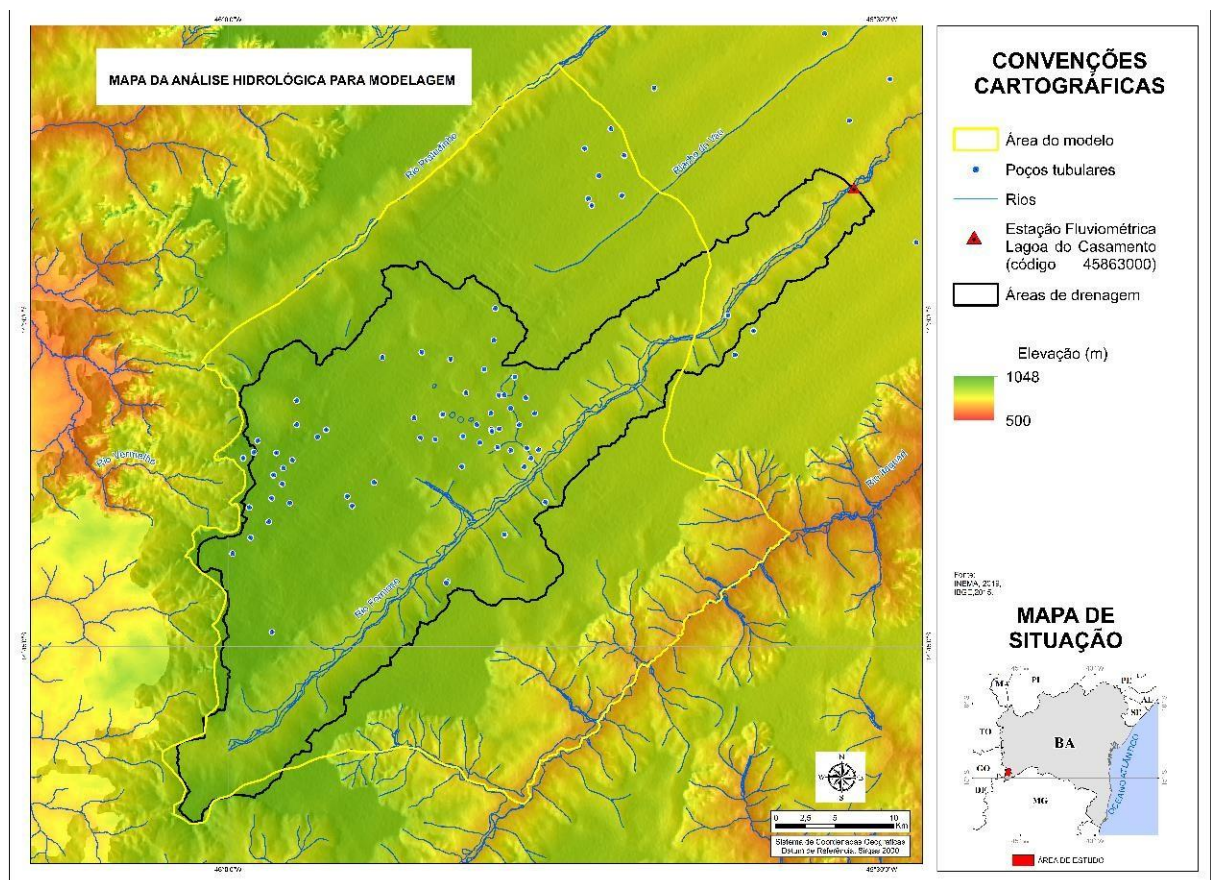


Figura 16 - Mapa com localização da estação fluviométrica Lagoa do Casamento em relação a área do modelo, como base do mapa, tem-se o modelo digital de elevação.



Fonte: Autoral.

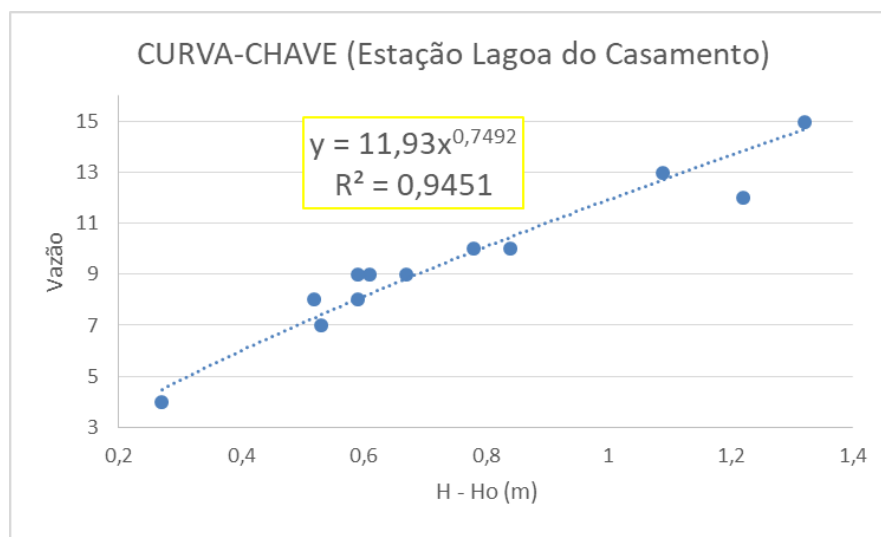
Em seguida foi gerada a curva-chave da estação escolhida, afim de se determinar a vazão no trecho do rio. A utilização de métodos diretos para determinar a vazão numa seção fluvial é uma tarefa demorada. Por isso, geralmente, procede-se a estimativa de descarga de forma indireta, através do uso da curva-chave (Brusa & Clarke, 1999). A curva-chave transforma a cota de nível de rio em vazão de escoamento fluvial. Geralmente, a expressão da curva-chave é determinada através da equação:

$$Q = C (h + a)^b,$$

onde Q é a vazão, h é o nível da régua correspondente, C e b são coeficientes próprios de cada estação e a é a diferença entre o zero da régua e o nível que representa a descarga nula.

O método utilizado para o traçado da curva chave foi o ajuste por mínimos quadrados, calculado através de equações matemáticas em planilhas eletrônicas. O valor obtido do coeficiente de erro quadrático (R^2) foi de 0.9451, apresentando uma boa correlação dos dados (Figura 17).

Figura 17 – Curva-chave gerada através dos dados da estação fluviométrica Lagoa do Casamento.



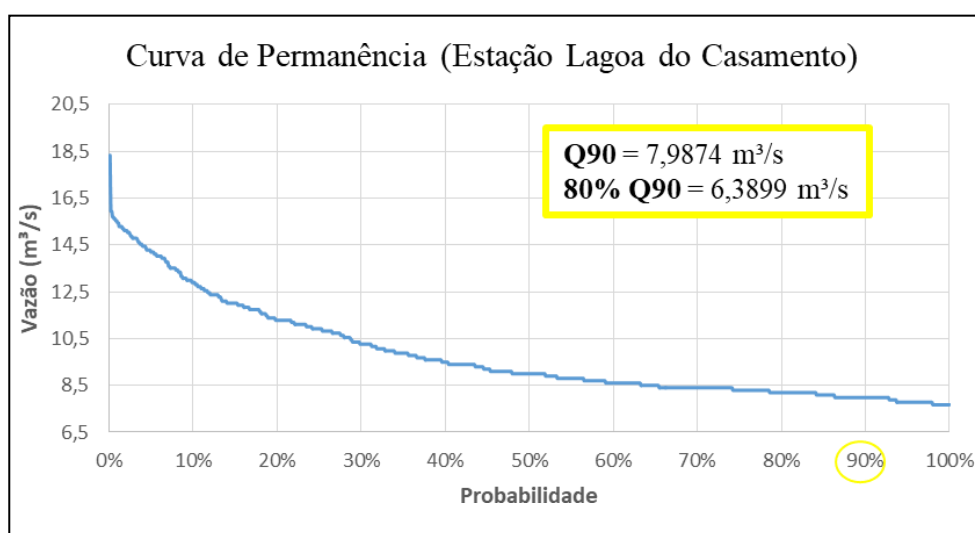
Fonte: Autoral.

A partir da equação da curva-chave acima e dos valores de medição de cota do rio, foram mensuradas as vazões fluviais do período de 2009 a 2012. Os valores obtidos foram somados as vazões de retiradas ou demandas, obtidas através dos documentos de

outorga concedidos pelo INEMA (2019). O resultado dessa soma corresponde as vazões naturalizadas.

Para se estimar a disponibilidade hídrica superficial, elaborou-se a curva de permanência da estação fluviométrica Lagoa do Casamento (Figura 18). A disponibilidade hídrica ou a vazão num rio depende da variabilidade temporal expressa por várias funções hidrológicas. A curva de permanência é uma função que caracteriza a frequência da oferta das vazões, o que permite avaliar a disponibilidade frente às demandas de um rio. curva de permanência ou de duração de vazões relaciona a vazão (geralmente no eixo das ordenadas) e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada sobre todo o período histórico utilizado para sua construção (geralmente no eixo das abscissas) (Cruz & Tucci, 2007).

Figura 18 - Curva de permanência do rio Formoso para a estação fluviométrica Lagoa do Casamento.



Fonte autoral.

Entretanto, como na área do modelo não tem estação fluviométrica com dados hidrológicos, foi necessário utilizar um método de transferência de informações. Nesse caso, ao procedimento de transferência de informações de vazão denomina-se regionalização. Entende-se por regionalização hidrológica, ou mais especificamente regionalização de vazões, o conjunto de procedimentos e métodos estatísticos que visam explorar ao máximo os dados existentes numa região, buscando-se permitir a estimativa da vazão num local com ausência ou insuficiência de dados. (Barbosa, 2005).

A regionalização de vazões foi efetuada por meio da correlação entre as vazões e as áreas de drenagem da estação fluviométrica e do modelo (Tabela 02). Para calcular as áreas de drenagem do rio Formoso nos dois pontos, aplicou-se técnicas de geoprocessamento. Utilizou-se dados de Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do rio Formoso, obtidos pelas imagens SRTM, no portal da EMBRAPA. Essa análise espacial foi executada através do software ArcGIS na sua versão 10.1. As ferramentas utilizadas foram respectivamente *Fill*, *Flow Direction*, *Flow Accumulation*, *WaterShed* e *Stream Order*.

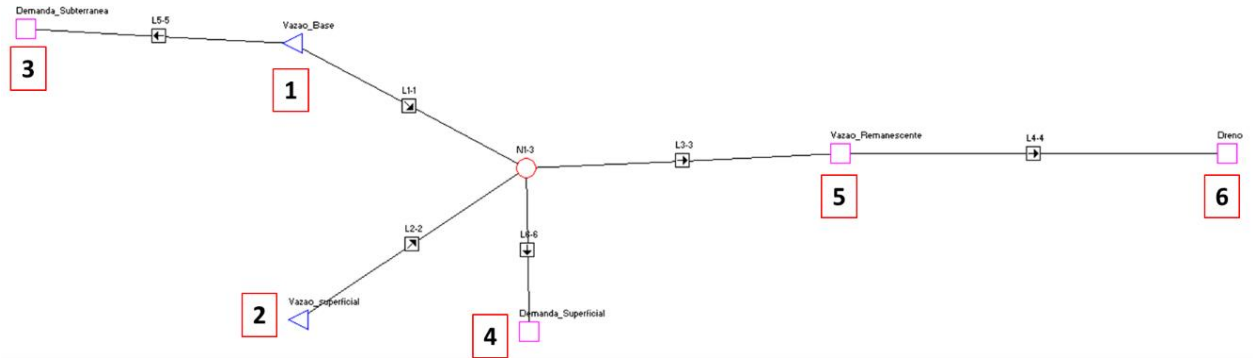
Tabela 02 – Correlação entre as vazões e as áreas de drenagem para a estação fluviométrica e o modelo.

Regionalização das vazões de referência Q90			
	Área (km ²)	Área (m ²)	Vazão (m ³ /s)
Estação	1.036	1035823250	7,987393064
Modelo	930	930000000	7,171373639

Por fim, os resultados do modelo hidrogeológico (Modflow) foram integrados aos cálculos acima descritos. O principal dado utilizado foi a contribuição do aquífero para o rio nos cenários utilizados. Dessa forma, foram separadas as vazões superficiais do escoamento de base. Esses valores foram inseridos no modelo de rede de fluxo (Acquanet), bem como todas as demandas subterrâneas e superficiais sinalizadas nos processos de outorga. Na figura 19 tem-se a tipologia do sistema hídrico modelado para alocação de águas superficiais e subterrâneas.

Nesse modelo de rede de fluxo para alocação de água foram elaborados três cenários para avaliação das demandas. O primeiro deles é o cenário atual de demandas hídricas superficiais e subterrâneas, identificadas através dos documentos de outorgas deferidas pelo INEMA. Já no segundo cenário, considerou-se o comprometimento de toda a vazão superficial disponível para outorgas do rio, ou seja 80% da vazão de referência Q90. O terceiro cenário representou o modelo hidrogeológico de 100 anos. Nessa simulação, a contribuição do escoamento de base foi levantada com base na superexploração do aquífero.

Figura 19 – Tipologia do sistema hídrico modelado para alocação de água. Os elementos foram identificados através de números para facilitar a descrição: 1. Vazão do escoamento de base; 2 – Vazões do rio menos o escoamento de base; 3 – Demandas de águas subterrâneas; 4 – Demandas de captação superficial; 5 – Vazão Remanescente do rio, a qual tem prioridade em todo o sistema; 6 – Elemento dreno que representa o deflúvio.



Fonte autoral.

CAPITULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para calcular a contribuição aquífero/rio no trecho do rio Formoso de interesse, foi utilizado um artifício disponível no MODFLOW denominado “Z-Budget”. Criou-se uma zona ZBUD em toda a condição de contorno DRAIN que representa o rio e calculou-se o volume de água que sai do sistema aquífero para essa zona. No primeiro cenário, em regime estacionário e sem o bombeamento dos poços, foi calculada uma contribuição de 414140,125 m³/dia do ZBUD para o dreno (rio Formoso). Já no segundo cenário, em regime transiente e representando as vazões de bombeamento dos poços, o modelo mostra uma contribuição de 412272,781 m³/dia. A diferença percentual entre os volumes de contribuição do aquífero para o rio nos dois cenários é de 0.451% por dia. Esses dados corroboram a importância da exsudação do aquífero para o rio.

Outro resultado relevante demonstra as condições de fluxo das águas subterrâneas na área estudada (Figura 20). O modelo evidencia que a maior parte do fluxo é preferencialmente para o rio Itaguari. O modelo também ratifica o divisor de águas subterrâneas, próximo a escarpa geomorfológica, onde parte do fluxo deriva para oeste, alimentando a bacia hidrográfica dos rios Tocantins-Araguaia. Sendo assim, as outorgas concedidas pelo INEMA dos poços localizados no extremo oeste interferem diretamente no fluxo das nascentes dos rios do estado de Goiás.

Já com relação as simulações de interferência entre poços e o rebaixamento do aquífero, foram simulados os efeitos do bombeamento ao longo de um período de 100 anos. Como essa simulação foi rodada em regime transiente, foi possível verificar o rebaixamento em diversos períodos. O modelo simula que nos primeiros 10 anos, o rebaixamento (*drawdown*) é de 20 metros na bateria dos poços. Enquanto que em 100 anos esse valor alcança 45 metros no extremo oeste da área modelada. Observa-se na figura 21 que a abrangência do rebaixamento avança ao longo dos anos e concentra-se nas fazendas com maiores aglomerados de poços tubulares.

Figura 20 - Mapa potenciométrico desenvolvido pelo modelo, zoom para divisor hidrogeológico

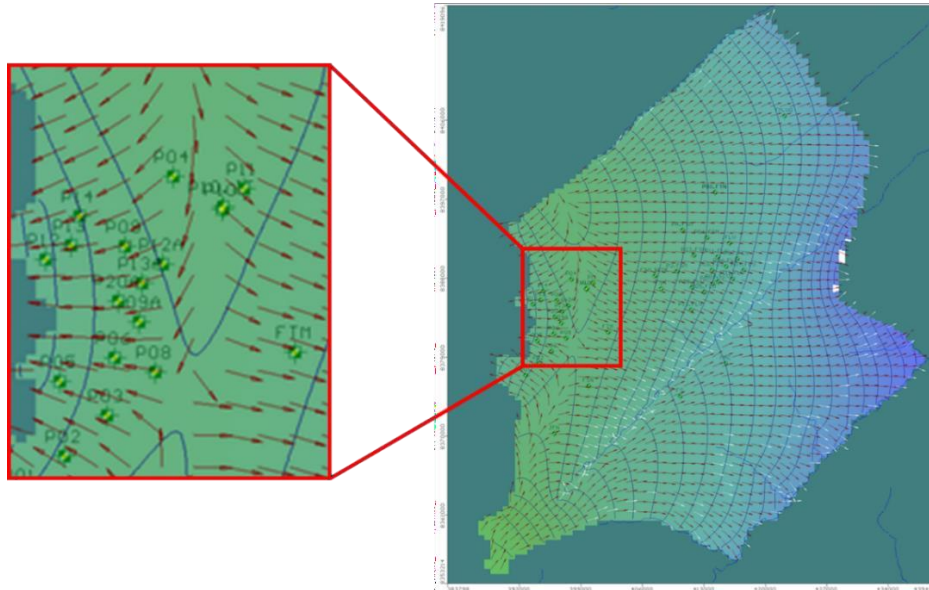
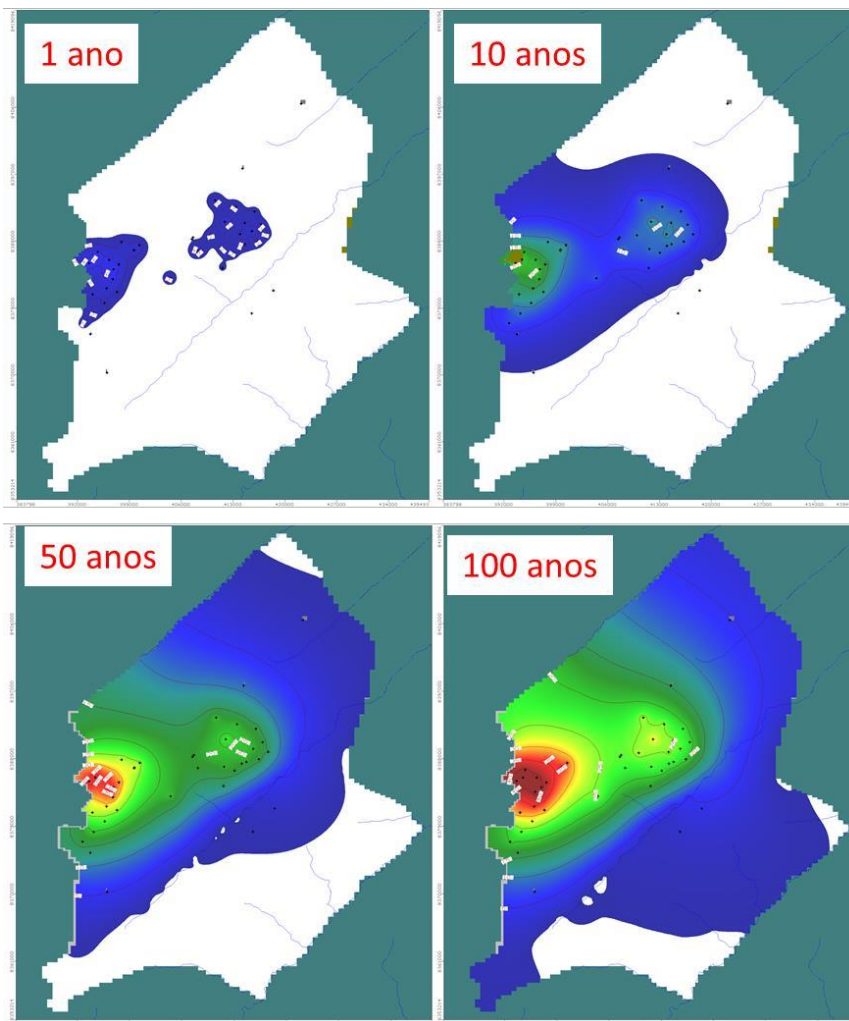


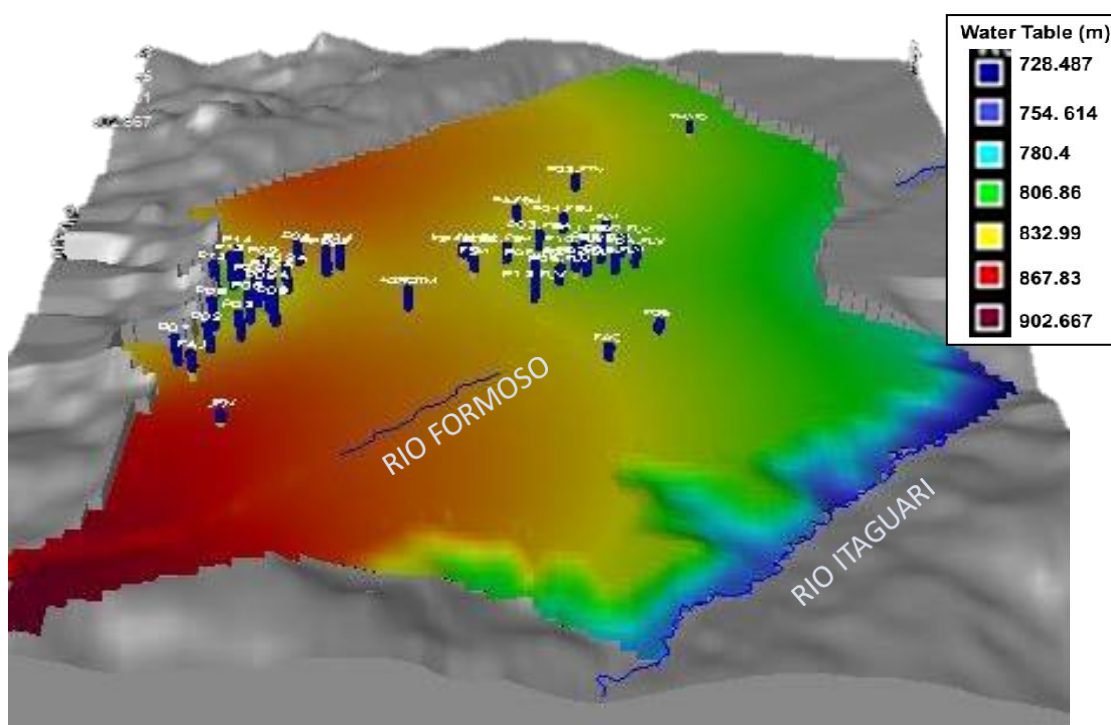
Figura 21 - Evolução do rebaixamento (drawdown) ao longo dos 100 anos de simulação.



Fonte: Autoral.

Observa-se ainda que os poços localizados nas bordas da Serra Geral, após o período de 100 anos, interferem diretamente nas nascentes localizadas na escarpa (Figura 22). O bombeamento dos poços outorgados pelo INEMA na área de estudo praticamente não interfere no rio Formoso.

Figura 22 - Modelo 3d de elevação do nível da água após regime de bombeamento de 100 anos, numa taxa contínua de 18h/dia.



Fonte: Autoral.

No modelo em rede de fluxo (Acquanet), os resultados mostram como a forte conexão hidráulica de rios e aquíferos interfere no balanço hídrico de distribuição de demandas (Figura 23). Nas simulações do cenário atual de demandas e do cenário que simula 100 anos de bombeamento demonstram que não há necessidade de retirada ou déficit de água do reservatório subterrâneo, além das demandas sinalizadas. Isso é explicado devido ao percentual baixo de diferença no escoamento de base (0.451%) entre os dois cenários, ou seja, quase não há interferência nos valores das vazões inseridas no modelo.

Figura 23 - Resultados das vazões de base e superficial médias mensais para as duas simulações: cenário de bombeamento atual e cenário de 100 anos de bombeamento. Entende-se como vazão superficial a vazão medida ou calculada para o rio menos o escoamento de base.

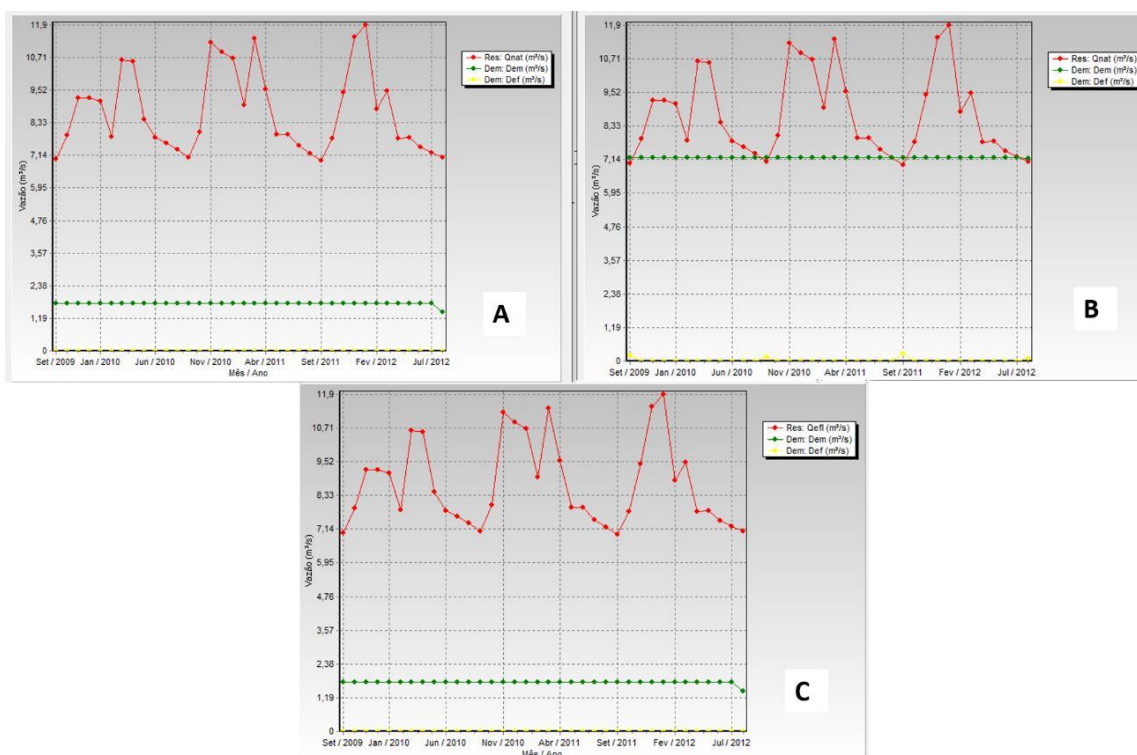
Cenário Atual			Cenário de 100 anos de bombeamento		
ÁREA DO MODELO			ÁREA DO MODELO		
MÊS/ANO	Vazão de base média mensal	Vazão superficial média mensal	MÊS/ANO	Vazão de base média mensal	Vazão superficial média mensal
01/11/2009	5,04	4,19	01/11/2009	5,04	4,19
01/12/2009	5,040104454	4,187411492	01/12/2009	5,017378791	4,210137155
01/01/2010	4,981795211	4,138967101	01/01/2010	4,959332463	4,161429849
01/02/2010	4,2732595	3,550302598	01/02/2010	4,253991515	3,569570583
01/03/2010	5,806764619	4,82436686	01/03/2010	5,780582112	4,850549368
01/04/2010	5,770938248	4,794601652	01/04/2010	5,74491728	4,820622619
01/05/2010	4,620038846	3,838413258	01/05/2010	4,599207245	3,859244859
01/06/2010	4,259110431	3,538547292	01/06/2010	4,239906245	3,557751479
01/07/2010	4,141349468	3,440709317	01/07/2010	4,122676262	3,459382524
01/08/2010	4,015624757	3,336254915	01/08/2010	3,997518439	3,354361233
01/09/2010	3,856822428	3,204319018	01/09/2010	3,839432144	3,221709302
01/10/2010	4,359027123	3,621559917	01/10/2010	4,339372415	3,641214625
01/11/2010	6,153783681	5,11267668	01/11/2010	6,126036476	5,140423885
01/12/2010	5,959048467	4,950887082	01/12/2010	5,932179316	4,977756232
01/01/2011	5,826763602	4,840982383	01/01/2011	5,80049092	4,867255065
01/02/2011	4,91368111	4,082376652	01/02/2011	4,891525485	4,104532276
01/03/2011	6,227674934	5,174066892	01/03/2011	6,199594555	5,20214727
01/04/2011	5,21796896	4,335184595	01/04/2011	5,194441312	4,358712243
01/05/2011	4,31794878	3,587431274	01/05/2011	4,298479293	3,606900761
01/06/2011	4,31794878	3,587431274	01/06/2011	4,298479293	3,606900761
01/07/2011	4,086698435	3,395304233	01/07/2011	4,068271648	3,41373102
01/08/2011	3,937556392	3,271394281	01/08/2011	3,919802082	3,289148591
01/09/2011	3,790577806	3,149281768	01/09/2011	3,773486217	3,166373356
01/10/2011	4,243410884	3,525503819	01/10/2011	4,224277486	3,544637217
01/11/2011	5,151979512	4,280359348	01/11/2011	5,128749408	4,303589451
01/12/2011	6,26398383	5,20423299	01/12/2011	6,235739736	5,232477084
01/01/2012	6,496491798	5,397404887	01/01/2012	6,467199333	5,426697352
01/02/2012	4,831701998	4,014266898	01/02/2012	4,809916015	4,036052881
01/03/2012	5,18932258	4,311384656	01/03/2012	5,165924098	4,334783138
01/04/2012	4,236966818	3,520149971	01/04/2012	4,217862476	3,539254313
01/05/2012	4,26290317	3,541698369	01/05/2012	4,243681882	3,560919657
01/06/2012	4,067324703	3,379208181	01/06/2012	4,048985272	3,397547612
01/07/2012	3,947301412	3,279490622	01/07/2012	3,929503161	3,297288873
01/08/2012	3,860521788	3,207392515	01/08/2012	3,843114825	3,224799479

Fonte Autoral.

. Por outro lado, quando se considera uma simulação na qual há uma captação superficial de 80% da vazão de referência, isto é, numa retirada de 5,740 m³/s no trecho modelado, ocorre a necessidade de retirar água do reservatório subterrâneo. Essa parcela de água que interfere no escoamento de base alcança o valor de 0,26 m³/s. Observa-se ainda que os déficits se concentram nos meses de agosto e setembro.

A figura 24 representa esses resultados através de gráficos nos três cenários simulados. Em vermelho, são os valores de vazão dos rios (escoamento de base mais vazões superficiais). A linha verde corresponde as vazões de retiradas (demandas subterrâneas e superficiais). Em amarelo, encontra-se o déficit, ou seja, a parcela de água que seria retirada do escoamento de base. Observa-se que quase não há diferença nas curvas dos cenários A e C. No caso do cenário de retirada superficial máxima outorgável (80% da Q90), o modelo apresenta déficits, isso ocorre quando a curva vermelha fica abaixo da curva verde.

Figura 24 - Resultados do sistema de retiradas modelado através do software Acquanet. A) Cenário atual de retiradas. B) Cenário na qual a retirada superficial é de 80% da vazão de referência Q90. C) Cenário de exploração contínua do aquífero em 100 anos de bombeamento dos poços



Fonte autoral.

Na análise de outorga de direito de recursos hídricos, os critérios utilizados (Instrução Normativa número 15) no domínio do SAU levam em consideração apenas a vazão de bombeamento e a distância mínima entre poços e entre poços e rios. Entretanto, como demonstrado pelos modelos, deve-se considerar também o fator tempo a longo prazo como fundamental para o gerenciamento do uso dos recursos hídricos subterrâneos. Além disso, deve-se calcular de forma integrada os volumes de águas subterrâneas e superficiais

outorgados, devido à forte interação aquífero/ rio. É importante ressaltar que no modelo a influência dos poços é considerada como resultado do somatório de todos os poços em bateria, e não individualmente, como nos estudos anteriores.

Fica evidente também que outro critério a ser analisado, além do distanciamento e vazão, seria a profundidade dos poços e dos filtros. Como nesse estudo a maioria dos poços tem seus filtros posicionados em profundidades maiores que 150 metros, a interferência no corpo hídrico do rio Formoso é baixa. Nesse local modelado, o fluxo deriva em sua maior parcela para o rio Itaguari. Nesse caso de estudo específico, numa escala local, poços rasos próximos aos rios tendem a apresentar maior interferência do que poços tubulares profundos.

Um dos impasses referente ao uso de modelos como suporte a decisão é quando dados pontuais e locais são extrapolados para grandes áreas. Isso ocorre frequentemente nos estudos do SAU, tendo em vista que poucos são os dados locais disponíveis. Nesse contexto, os cálculos são muitas vezes baseados numa interpretação física controversa gerando incertezas. Por isso, é importante que em áreas de conflitos e grande pressão no uso de águas subterrâneas, o requerimento de outorga deve ser acompanhado por um estudo de modelagem, fomentando a aquisição de dados locais.

CAPITULO VII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante ressaltar que esse estudo é local e pontual, sendo piloto no seu propósito de elaborar um modelo de sistema de suporte a decisão na outorga de recursos hídricos subterrâneos. Recomenda-se fortemente a utilização de modelos matemáticos como ferramenta a tomada de decisão na outorga de captação subterrânea, especialmente quando se trata de aquíferos com forte interação com os rios. Os modelos são ferramentas que podem ser constantemente atualizadas, com entradas de dados e melhores refinamentos, capazes de atender as necessidades no momento da avaliação dos requerimentos de outorga. O estudos locais devem alimentar esses modelos, respeitando-se as características do aquífero.

Por fim, a utilização dos modelos possibilitaria a maior eficiência na relação entre gestores e usuários, tendo em vista que se torna mais simples e rápido as projeções de bombeamento dos poços requeridos. Portanto, os modelos matemáticos podem dinamizar os processos de outorga, avaliando as projeções de super exploração e cenários de depleção dos níveis potenciométricos dos aquíferos ao longo dos anos.

Esse estudo demonstra veemente que as vazões superficiais geradas no oeste da Bahia são uma resposta da acentuada da interação com o SAU. Essas parcelas de água fluem na direção leste, desaguando no rio São Francisco. Apesar dos avanços no conhecimento sobre as águas no oeste da Bahia, cabem ainda algumas recomendações para a melhoria na gestão dos recursos hídricos, como descrito a seguir.

- i) O manejo sustentável dos terrenos, através da preservação da reserva legal, das APP's e pelo menos 20% das áreas de recarga do Sistema Aquífero Urucuia. Os produtores podem delimitar as áreas de reserva legal a partir das áreas de recarga do aquífero;
- ii) Implementação de novas estações fluviométricas de monitoramento;
- iii) Implementação de novos poços de observação para monitoramento do nível do aquífero;
- iv) Desenvolvimento de estudos de caráter local, considerando-se as características intrínsecas ao aquífero e não o generalizando;

- v) Estudos de vulnerabilidade do aquífero e aprimoramento da fiscalização.
- vi) Implementação da obrigatoriedade de se apresentar estudos de modelagem e disponibilidade hídrica subterrânea no requerimento ou renovação de outorga, no caso de poços com vazões superiores a 300m³/h;
- vii) Os requerentes devem apresentar no ato de requerimento de outorga, relatórios com interpretação de testes de bombeamento, ou seja, determinação dos parâmetros hidrodinâmicos T, K e S. Dessa forma, alimenta-se um banco de dados sobre o aquífero.
- viii) Do ponto de vista de análise técnica do órgão gestor, faz-se necessário o cálculo de balanço hídrico subterrâneo (disponibilidade X demanda) integrado com o setor de outorga superficial para avaliar a demanda solicitada.
- ix) Recomenda-se fortemente um estudo de modelagem com simulações de escassez hídrica e mudanças climáticas e, por conseguinte, aumentos de temperatura e diminuição de precipitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.,1977. O cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo: SBG, v. 7, n. 4, p. 349-364.

ANA - Agência Nacional Das Águas. 2017. Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, Relatório Final. Vol. 2, 138p.

ANA - Agência Nacional Das Águas. 2018. Hidrogeologia dos Ambientes Cársticos da Bacia do Rio São Francisco para a Gestão de Recursos Hídricos. Relatório Final – Volumes I, II e III - Brasília: ANA, 2018.

ANA – Agência Nacional De Águas. 2013. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013. Agência Nacional de Águas. Brasília. 432 p.: II.

BAHIA Subprojeto 3.2 - Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas - Bahia, Superintendência de Recursos Hídricos - SRH, In: Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, ANA/GEF/PNUMA/OEA. 165 p. 2003.

BAHIA. Decreto Estadual nº 6.296, de 21 de março de 1997. Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos, infração e penalidades e dá outras providências. Diário Oficial [do] Estado da Bahia, Salvador, 22 de março de 1997.

BARBOSA S. E. S. et al. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 09, 2005, Campo Grande. Anais [Vol.10, nº 1 - jan/mar, p. 64-71, 2005]. Campo Grande: Centro de Exposições Albano Franco, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sciarttext&pid=S1413-41522005000100008>
Acesso em: 9 de fevereiro de 2019.

BARBOSA, N. S. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Urucuia. 2016. 168 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

Barbosa, N. S.; Santos, R. L. S.; Casais, J. C. A crônica de uma morte anunciada: a gestão de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Urucuia (SAU). Anais do 28º Simpósio de Geologia do Nordeste. Aracaju, 2019.

BEVEN, K.J., Rainfall-runoff modelling: The primer. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England. 2000a.

Bonfim, L.F.C., Gomes, R.A.A.D., 2004. Aquífero Urucuia – Geometria e Espessura: Ideias para Discussão. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, XX, Cuiabá (MT), Anais. 1 CD- ROM.

BRASIL. Lei Federal nº. 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Senado Federal, Brasília- DF, 1997.

BREDEHOEFT, J., The conceptualization model problem - surprise. Hydrogeology Journal, 13: 37-46. 2004.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Contribuição à Estratigrafia da Bacia do São Francisco, na Região de Posse, GO. Boletim de Geociências do Centro-Oeste, [S.I], n. 16, p. 51-66, 1993.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. Revista Brasileira de Geociências, [S.I], v. 27, n. 3, p. 283-294, set. 1997.

Comitê da RPGA do Rio Corrente e Riachos do Ramalho, Serra Dourada e Brejo Velho-BA. Nota Técnica 7 – Caracterização e Disponibilidade de Recursos Hídricos Subterrâneos. Disponível em <<https://www.prhcorrenteba.com/relat%C3%B3rios>>, acessado em 20 de novembro de 2020.

Cruz, J. C. TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica através da Curva de Permanência. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), Vol13, n1. Janeiro de 2008.

Cruz, P.K.S.G. (2003). Simulação do transporte e reabilitação de contaminações de hidrocarbonetos em solo. Dissertação de mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Ramo de Geoambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Portugal.

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

GASPAR, M.T.P. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2006.

GÓES, V. M. Hidrodinâmica e Sustentabilidade do Aquífero Urucuia Extremo Ocidental na região da divisa entre os estados da Bahia e de Goiás. Trabalho final de graduação. 2018. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador – Bahia.

Gonçalves, R. D., Engelbrech, B. Z., Chang, H. K. 2018 Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o rio São Francisco, Brasil. Revista Águas Subterrâneas, v. 32, no 1, p. 1-10.

Gurdak JJ, Qi SL (2006) Vulnerability of recently recharged ground water in the High Plains aquifer to nitrate contamination. US Geol Surv Sci Invest Rep 2006-5050, 39 pp. INEMA/PGRH/BIRD, Salvador-BA, pp. 125,2002.

LAUTZE, J. et al. Putting the cart before the horse: water governance and IWRM. Natural Resources Forum. United Nations, v. 35, p. 1-8, 2011.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. Cienc. Cult. São Paulo, v. 63, n. 3, p. 27-29, Jul. 2011. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252011000300011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 23 nov. 2017.

Lima, O.A.L., 2000. Estudos geológicos e geofísicos do aquífero Urucuia na Bacia do Rio Cachorro- Oeste do Estado da Bahia. Relatório técnico. Superintendência de Recursos Hídricos- SRH/ Centro de Pesquisas em Geofísica e Geologia- CPGG/UFBA. 42 p.

MAIA, P. H. P.; & RODRIGUES, Z. R. C.; Estratégias Para Gestão das Águas Subterrâneas do Aquífero Urucuia Na Região Oeste Da Bahia. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Bonito – MS, 2012.

Mantovani E. C., Silva Júnior A. G., Costa M. H., Eduardo A. G. M., Silva Júnior G. C., Pruski F. F. 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. Viçosa, MG: [S.n.], 2019 359p.

Maupin MA, Barber NL (2005) Estimated withdrawals from principal aquifers in the United States, 2000. US Geol Surv Circ 1279:1–46.

McDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W., A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model, Report Number Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1, 83-875, U S Geological Survey, 1988.

McDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W., A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model, Report Number Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1, 83-875, U S Geological Survey, 1988.

MONTEIRO, P. B. C. L., Proposta Metodológica para a Gestão das Águas Subterrâneas no Estado do Piauí. 208 f. Dissertação de mestrado, ProfÁgua, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

Oliveira, L. T., Klammler, H., Bastos Leal, L.R., Grissolia, M. 2019. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia – Brazil. Rev. Ambient. Água vol. 14 n. 6, p. 1-15.

Pousa R., Costa M. H., Pimenta F M, Fontes, V. C., Brito, V. F. A., Castro, M. 2019. Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring. 2019. Water, no11, 933, p. 1-21.

RAMOS, C. A. Hidrogeologia e Sustentabilidade do uso das águas do Aquífero Urucuia na região da divisa entre os estados da Bahia e de Goiás, Brasil. Trabalho final de graduação. 2018. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador – Bahia.

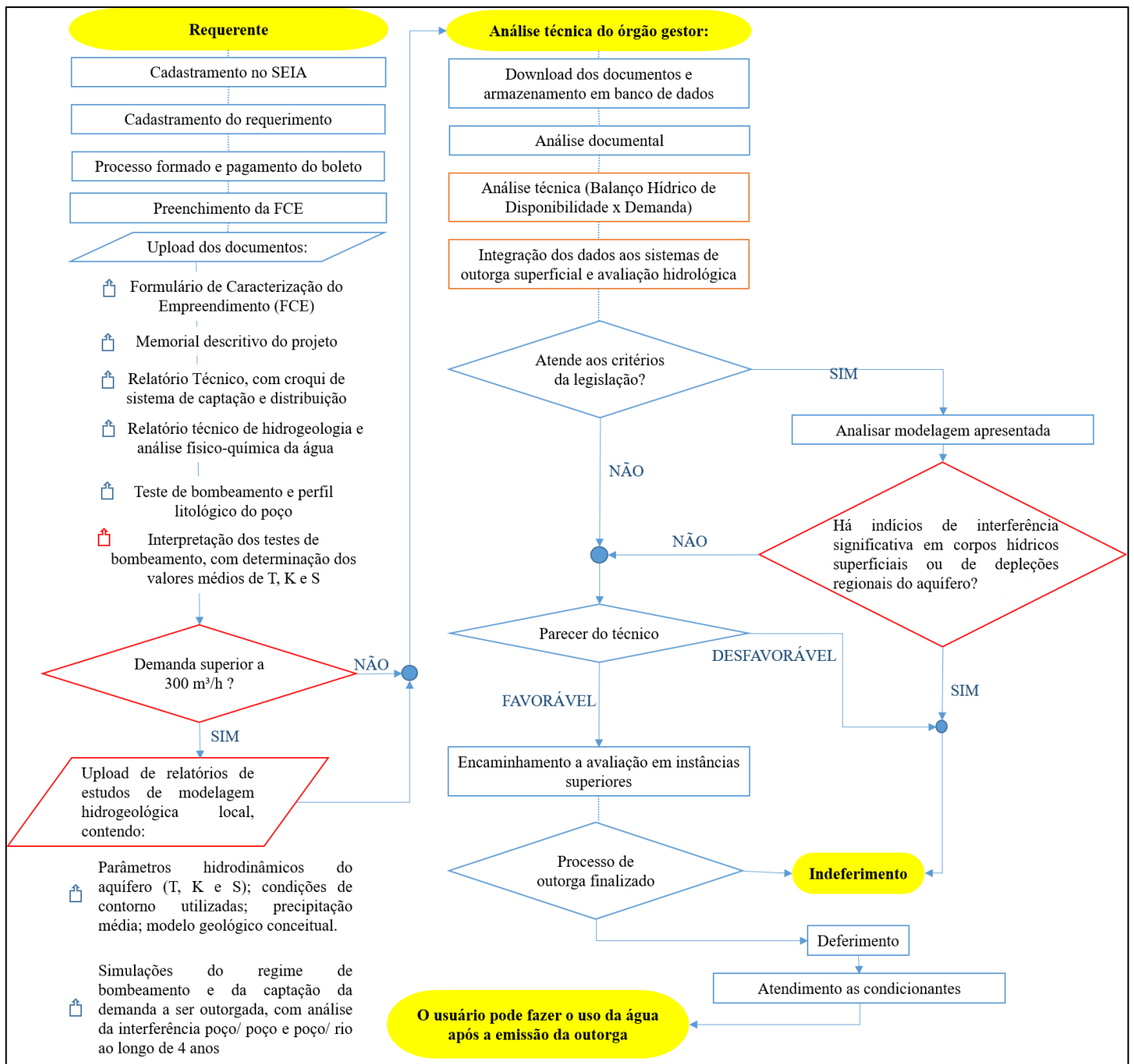
Reis, P. Al. G. Avaliação das vazões de contribuição da bacia hidrográfica do rio grande à calha do rio são francisco para atendimento dos usos múltiplos. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

Rodrigues, Z.R.C. (2013). Aplicação de modelos analíticos para outorga e gestão integrada dos recursos hídricos na bacia do Rio Grande. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFBA, Salvador – BA. 98P.

- SANTOS FILHO, M. O processo de urbanização no Oeste baiano. Recife: SUDENE, 1989. 281p. (Série de Estudos Urbanos, 1).
- SANTOS, C. C. M. Impactos da modernização da agricultura no oeste baiano: repercussão no espaço do Cerrado a partir da década de 1980. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2000. 233f.
- SANTOS, F. R.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Análise do comportamento hidrológico da bacia Hidrográfica do rio Grande, estado da Bahia, Brasil. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal – RN. 2014
- SCHUSTER, H. D. M. Modelagem de Fluxo Subterrâneo com Vistas à Definição de Parâmetros para Outorga de Mananciais Subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio de Cachorro Oeste do Estado da Bahia. Relatório Final Contrato n° 0022/2001-INEMA/PGRH/BIRD, Salvador-BA, pp. 125,2002.
- SCHUSTER, H. D. M., Modelagem de Fluxo Subterrâneo com Vistas à Definição do Distanciamento Entre Poços e Mananciais no Oeste Baiano. Relatório Final Contrato n° 034/2003- SRH/PGRH/BIRD, Salvador – BA, 2003.
- SGARBI, G.N.C. Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais. 1989, 324p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.
- Sophocleous, M. Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommended actions. Hydrogeological Journal, 2010.
- Tschiedel, M. W., 2004. Aplicação de estudo geofísico como contribuição ao conhecimento da tectônica da Sub-Bacia Urucuaia. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, 76 p.
- Water Education Models, West Virginia Department Of Environmental Protection. Disponível em: <<https://dep.wv.gov/WWE/getinvolved/WET/Pages/models.aspx>>. Acesso em: 2 de março de 2020.
- WHEATER, H.S., JAKEMAN, A.J. & BEVEN, K.J., Progress and Directions in Rainfallrunoff Modeling. In: A.J. Jakeman, M.B. Beck & M.J. McAleer (Editors), Modeling changes in environmental systems. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 101-132, 1993.

APÊNDICE I – MODELO DE SISTEMA DE SUPORTE A DECISÃO AO PROCESSO DE OUTORGA DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Produto elaborado por Caroline Assunção Ramos como um dos critérios de aprovação no Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA) da Universidade Federal da Bahia (UFBA).



Esse produto foi idealizado a partir da análise conjunta de modelagens matemáticas, na área piloto do trecho do rio Formoso, e do mapeamento do processo atualmente utilizado na outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos no estado da Bahia. Entretanto, pode ser aplicado a qualquer outro aquífero sedimentar com forte conexão hidráulica com os rios nos diversos estados brasileiros. A proposta principal é inserir no processo de outorga uma avaliação técnica mais apurada, além das já realizadas análise documental e análise do atendimento aos critérios previstos na lei. Isso é possível através da modelagem hidrogeológica, como descrito a seguir. Cabe ressaltar que no esquema de fluxograma acima apresentado, todos os itens em vermelho são propostas de inclusão aos demais procedimentos já existentes.

O modelo de sistema inicia-se no ato de cadastramento do requerente no sistema de informações ambientais estaduais. Deve ser realizado também o cadastro do requerimento, ou seja, a solicitação de processo de outorga de recursos hídricos subterrâneos. Após isso, o processo é formado e o boleto de pagamento referente as taxas é liberado. O requerente precisa então preencher o Formulário de Caracterização do Empreendimento (FCE) e fazer o upload dos relatórios e documentos previstos pela portaria estadual. No caso do estado da Bahia, como já mencionado anteriormente, esses documentos são: i) FCE; ii) memorial descritivo do projeto; iii) relatório técnico contendo croqui do sistema de captação e distribuição; iv) relatório de hidrogeologia; v) teste de bombeamento e perfil litológico do poço. Alguns estados também exigem esses relatórios, mas com nomenclaturas diferentes.

Como proposta, além dos relatórios supracitados, também será necessário anexar um relatório contendo a interpretação dos testes de bombeamento e determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero explotado (T, K e S). Essa etapa visa a ampliação e alimentação das informações do aquífero no banco de dados do órgão gestor. Esses documentos devem ser acompanhados pelas suas respectivas Anotações de Responsabilidade Técnica (ARTs) emitidas pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA).

Caso a demanda solicitada seja inferior a 300 m³/h o processo tem sua continuidade da forma atualmente prevista na maioria dos estados brasileiros. Vale ressaltar que esse valor de vazão (300 m³/h) foi estipulado com base na situação e condição do SAU e deve ser revisado em outros aquíferos. Para demandas superiores a 300 m³/h, é necessário que o requerente apresente também um estudo de modelagem

hidrogeológica com simulações do regime de bombeamento solicitado no processo de outorga.

O processo volta-se então para a análise técnica do órgão gestor. O analista deve efetuar o download dos documentos anexados pelo requerente, bem como o armazenamento desses no banco de dados. É realizada mais uma vez análise documental, visando avaliar se o requerente cumpriu com todos os critérios estabelecidos em portarias, como citado anteriormente.

Na maioria dos órgãos gestores estaduais brasileiros não é realizada uma análise técnica de balanço hídrico para captação subterrânea. Isso é comum em outras atividades passíveis de outorga, como captação superficial e lançamento de efluentes. Entretanto, em situações de complexidade hidrodinâmica e de conflitos pelo uso das águas do aquífero, essa análise se faz totalmente necessária. Além disso, o órgão gestor pode desenvolver um sistema no qual o técnico possa inserir essa análise ao núcleo de outorga de captação superficial, afim de se realizar uma avaliação integrada das águas superficiais e subterrâneas.

Caso o requerente não atenda aos critérios previstos na legislação, a outorga pode ser indeferida. Nos casos em que atende, o analista deve avaliar os estudos de modelagem hidrogeológica, quando apresentados. Uma vez que os estudos não apresentem indícios de rebaixamento regional considerável ou interferências significativas em corpos hídricos superficiais, o técnico pode encaminhar o parecer favorável a avaliação de instâncias superiores. É realizada então uma nova avaliação e revisão da análise do técnico. Por fim, o processo de outorga é concluído, sendo indeferido ou deferido caso as condicionantes sejam atendidas.

Sendo assim, o planejamento integrado do uso de recursos hídricos subterrâneos e superficiais pode ser realizado através de modelos matemáticos. O método utilizado nesse estudo aponta vantagens, como a possibilidade de uma análise mais assertiva e rápida dos efeitos que o bombeamento de poços causa nos rios e na depleção regional do aquífero. Além disso, modelos são simples de serem utilizados por hidrogeólogos e analistas técnicos dos órgãos gestores. Isso possibilita a inserção da análise de disponibilidade hídrica subterrânea na rotina da avaliação dos processos de outorga. Outra vantagem é que os estudos serão realizados localmente, evitando a extrapolação de informações e fomentando a aquisição de dados hidrodinâmicos do aquífero.

Entretanto, algumas limitações foram também identificadas, como a necessidade de capacitação dos técnicos para colocar em prática o uso de modelos hidrogeológicos na decisão. Da mesma forma, são necessários investimentos em recursos e esforços para se desenvolver sistemas integrados de suporte a decisão.