

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO USO DA ÁGUA  
DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NA ZONA URBANA DE  
MANAUS**

**MATEUS ALVES SARAIVA**

MANAUS - AM

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**MATEUS ALVES SARAIVA**

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO USO DA ÁGUA  
DO AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NA ZONA URBANA DE  
MANAUS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós  
– Graduação em Geociências da  
Universidade Federal do Amazonas como  
requisito para obtenção do título de mestre  
em Geociências.

**Orientador: Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried**

MANAUS - AM

2017

### Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S243a Saraiva, Mateus Alves  
Avaliação da sustentabilidade do uso da água do Aquífero Alter do Chão na zona urbana de Manaus / Mateus Alves Saraiva. 2017  
73 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Ingo Daniel Wahnfried  
Dissertação (Mestrado em Geociências - Geologia Ambiental) -  
Universidade Federal do Amazonas.

1. Hidrogeologia. 2. Modelamento numérico. 3. Manaus. 4.  
Amazonas. I. Wahnfried, Ingo Daniel II. Universidade Federal do  
Amazonas III. Título

MATEUS ALVES SARAIVA

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DO USO DA ÁGUA DO  
AQUÍFERO ALTER DO CHÃO NA ZONA URBANA DE MANAUS

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Geociências da Universidade Federal  
do Amazonas, como requisito parcial  
para obtenção do Título de Mestre  
em Geociências, área de  
concentração em Geociências.

Aprovado em 16 de outubro de 2017.

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried, Presidente.  
Universidade Federal do Amazonas

  
Prof. Dr. Roberto César de Mendonça Barbosa, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas

  
Prof. Dr. Helder Manuel da Costa Santos, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas

## **AGRADECIMENTOS**

A execução desse trabalho só foi possível graças à contribuição de diversas pessoas e instituições, por isso, sou muito grato a todos.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Geralda e José Maria Saraiva, que me trouxeram à vida, me criaram, deram todas as condições para o meu desenvolvimento e sempre me apoiaram.

Ao meu irmão Gabriel e à minha namorada Amanda, por me apoiar, incentivar e aturar nos momentos difíceis.

Ao meu orientador, Professor Dr. Ingo Daniel Wahnfried, que confiou em minha capacidade, me ensinou, instruiu e a quem devo grande parte da minha evolução profissional. É um exemplo de um profissional que quero me tornar.

Agradeço aos amigos que fiz durante a graduação, que me acompanharam durante o mestrado e me ajudaram com tarefas básicas, desde correr na reprografia pra imprimir documentos, até em fazer meus dias melhores. A estes não cabe citar nomes, já que certamente esqueceria alguém e seria injusto.

Agradeço aos meus parceiros de trabalho e amigos Bruno e Katy, pelas conversas, apoio e partilharem do mesmo sonho.

Ao CNPq, que me forneceu a bolsa de pesquisa durante todo o período do mestrado.

À Universidade Federal do Amazonas, minha casa por mais de sete anos. Local que me proporcionou as melhores amizades, uma segunda família e o sonho de me tornar um Geólogo.

## RESUMO

*Manaus, a capital do estado do Amazonas, situa-se na confluência dos rios Negro e Solimões, onde se forma o rio Amazonas. A cidade é a mais populosa do Estado do Amazonas, com 2.020.301 habitantes, e um crescimento populacional de 33% a cada década, em média. Nela foi implantada, na década de 1950, a Zona Franca de Manaus, que possibilitou a estruturação de um polo industrial expressivo. Atualmente, este polo conta com 488 indústrias, segundo a Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), em sua maioria nas áreas de tecnologia e montadoras de motocicletas, responsáveis pela geração de aproximadamente 110 mil empregos diretos, colaborando com 1,4% do PIB nacional. Sob toda esta atividade está o Aquífero Alter do Chão (AAC), inserido na Formação Alter do Chão, constituída por intercalações de camadas arenosas, siltosas, argilosas e conglomeráticas. O AAC possui permeabilidade e espessuras variadas, atingindo, em Manaus, uma espessura máxima de 190 m. A cidade de Manaus possui quase 3.000 poços cadastrados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), e são estimados mais de seis mil poços clandestinos. Vários fatores levaram ao uso intensivo de água subterrânea: a intensa utilização por parte da indústria do Polo Industrial de Manaus; malha da rede de distribuição de água que não abrange a cidade por completo; falhas e interrupções do abastecimento; a antiga má qualidade da água distribuída pelo sistema público (problema atualmente sanado); aumento intenso da população da cidade aliado à malha deficitária. Estes fatores levam à discussão sobre a sustentabilidade do atual uso do AAC na cidade de Manaus. Este trabalho teve como objetivo principal compreender o panorama e a dinâmica atual dos usos e fluxo da água subterrânea, avaliou possíveis alterações ocasionadas por fatores antrópicos, como o aumento e diminuição do número de poços, e por fatores naturais, como a ocorrência de extremos climáticos e a tendência no decréscimo da pluviosidade anual.*

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogeologia; modelamento numérico; Manaus; Amazônia

## **ABSTRACT**

*Manaus, the capital of the Amazonas State, is located at the confluence of the Negro and Solimões rivers, where the Amazonas River forms. The city is the most populous in the state of Amazonas, with 2,020,301 inhabitants, and a population growth of 33% in each decade, on average. In it, was established in the 1950s, the Free Trade Zone of Manaus, which made possible the structuring of an expressive industrial pole. Currently, this polo has 488 industries, according to the Superintendência da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), mostly technology and motorcycle manufacturers, responsible for the generation of approximately 110 thousand direct jobs, collaborating with 1.4% of National GDP. Under all this activity is the Alter do Chão Aquifer (ACA), inserted in the Alter do Chão Formation, consisting of intercalations of sandy, silty, clayey and conglomeratic layers. The ACA has a varied thickness and permeability, reaching, in Manaus, a maximum thickness of 190 m. The city of Manaus has almost 3,000 wells registered in the Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), and are estimated more than six thousand clandestine wells. Several factors led to the intensive use of groundwater: the intense use by the industry of the Manaus Industrial Pole; water distribution network that does not fully cover the city; faults and interruptions in supply; the former water poor quality distributed by the public system (problem currently healed); an intense increase of the population of the city allied to the deficit network. These factors lead to the discussion about the sustainability of the current use of ACA in Manaus. The main objective of this work was to understand the current panorama and dynamics of the uses and groundwater flow, evaluated possible changes caused by anthropic factors, such as the increase and decrease in the number of wells, and by natural factors such as the occurrence of climatic extremes and the decrease trend in annual rainfall.*

**KEY WORDS:** Hydrogeology; numerical modelling; Manaus; Amazon

## Conteúdo

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1. Objetivos .....	13
1.1.1. <i>Objetivo geral</i> .....	13
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA</b> .....	13
2.1. Localização e caracterização .....	13
2.2. Contexto geológico .....	16
2.3. Modelo conceitual hidrogeológico .....	18
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
3.1. Aquíferos.....	20
3.2. Propriedades físicas da água.....	21
3.2.1. <i>Densidade e compressibilidade</i> .....	22
3.2.2. <i>Viscosidade</i> .....	23
3.2.3. <i>Tensão superficial e capilaridade</i> .....	23
3.3. Propriedades dos meios porosos.....	24
3.3.1. <i>Porosidade</i> .....	24
3.3.2. <i>Tamanho do grão</i> .....	25
3.4. Interação entre as propriedades dos meios porosos e as propriedades físicas da água – Princípios de fluxo .....	25
3.4.1. <i>Lei de Darcy e condutividade hidráulica (K)</i> .....	25
3.4.2. <i>Transmissividade (T)</i> .....	26
3.4.3. <i>Vazão específica</i> .....	26
3.4.4. <i>Armazenamento específico (S<sub>s</sub>)</i> .....	26
3.5. Gestão de quantidade .....	27
3.6. Modelagem numérica aplicada à hidrogeologia .....	29
3.6.1. <i>Condições de contorno</i> .....	31
<b>4. SOFTWARE GROUNDWATER VISTAS (GwV)</b> .....	32
4.1. Software de cálculo de fluxo .....	32
4.1.1. <i>MODFLOW</i> .....	32
4.1.2. <i>MODFLOW 2000</i> .....	34
4.2. Software para cálculo do transporte de partículas .....	35
4.2.1. <i>MODPATH</i> .....	35
4.3. Software de calibração.....	35

4.3.1. <i>PEST</i> .....	35
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
5.1. Seleção de código e ambiente de modelamento .....	38
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
6.1. Bases gráficas para o modelo.....	38
6.2. Elaboração do modelo .....	41
6.3. Calibração do modelo .....	48
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	<b>64</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>66</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas da água de acordo com as condições normais de temperatura e pressão (CNTP). .....	22
Tabela 2: Valores médios de porosidade para rochas (FITTS, 2012). .....	24
Tabela 3: Distribuição granulométrica em sedimentos inconsolidados (FITTS, 2012). .....	25
Tabela 4: Variação da cota do Rio Negro, em metros, durante uma década, medida no Porto de Manaus (PORTO DE MANAUS, 2017). .....	42
Tabela 5: Relação entre camadas do modelo e sua equivalência estratigráfica .....	45
Tabela 6: Dados estatísticos pós-processo de calibração do modelo. ....	50
Tabela 7: Projeção de elevação da temperatura global, em °C (IPCC, 2014). .....	51
Tabela 8: Projeção de elevação do nível do mar, em metros (IPCC, 2014). .....	51
Tabela 9: Projeção de variação na precipitação para a região Amazônica até o ano de 2100, tendo como base o intervalo entre os anos 1901 -2013. (IPCC, 2014) .....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área urbana de Manaus.....	15
Figura 2: Coluna estratigráfica do Paleozóico, Cretáceo, Paleógeno e Neógeno da porção Central da Bacia do Amazonas, e os limites estratigráficos identificados pelas superfícies de erosão, denominados informalmente de Sd1, Sd2 e Sd3 por Soares, 2007. (SOARES ET AL, 2016).....	18
Figura 3: Seção geológica entre Manaus e Itacoatiara, mostrando a relação geométrica entre as litologias ao longo do perfil (SOARES; WAHNFRIED; DINO, 2016).....	19
Figura 4: Zoneamento de condutividade hidráulica (SHAFT, 2005).....	20
Figura 5: Seção cruzada de um sistema com aquífero livre e confinado. ....	21
Figura 6: Diagrama do experimento elaborado por Henry Darcy para descrever o fluxo de um fluido através de um meio poroso (modificado de FREEZE & CHERRY, 1979).....	26
Figura 7: Protocolo para a elaboração de um modelo hidrogeológico (Anderson & Woessner, 2002. Tradução feita pelo autor). ....	37
Figura 8: Comparação entre o arquivo com drenagens bifiliares (A) e o produto unifilar gerado (B).....	39
Figura 9: Modelo Digital de Elevação utilizado no modelamento. ....	40
Figura 10: Início do processo de desenho do modelo, com a delimitação das condições de contorno e adaptação da malha.....	43
Figura 11: Condição de contorno utilizada para simular os igarapés da cidade de Manaus. ....	44
Figura 12: Seção cruzada em direção E-W do modelo numérico, representando a topografia. A cor preta são as zonas sem fluxo, limites externos do modelo. ....	45
Figura 13: Distribuição espacial dos dados de dados de condutividade hidráulica inseridos no modelo. ....	46
Figura 14: Distribuição dos valores e zonas de recarga inseridos no modelo.....	48
Figura 15: Projeção do panorama econômico para o ano de 2018 e comparação com o ano de 2017, mostrando a tendência de crescimento da economia (Crescimento do PIB) e aumento da produção industrial(BRASIL, 2017). ....	53
Figura 16: A) Cenário simulado para o ano de 2017 mostrando o rebaixamento acentuado na região centro-leste e a reversão de fluxo na zona oeste. B) Modelo elaborado pela Shaft (2005), para o ano de 2015.....	56
Figura 17: Figura 15: Projeção para o ano de 2020, em um cenário de crescimento econômico e implementação de medidas para o uso racional do aquífero. ....	57
Figura 18: Projeção pessimista para o ano de 2020, com o aumento de 15% na exploração.....	58
Figura 19: Presença de células secas na porção superior central do perfil no modelo numérico, em roxo. As demais colorações indicam diferentes níveis de coluna hidrostática.....	59

Figura 20: Cenário para o ano de 2025 em projeção otimista, que prevê a diminuição do crescimento da população e a continuidade de investimentos em políticas públicas de saneamento básico.....	60
Figura 21: Projeção feita para o ano de 2025 em um cenário de aumento de 30% na exploração, para profundidades de até 60 metros. ....	60
Figura 22: Projeção para o ano de 2035. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5. ....	61
Figura 23: Projeção para o ano de 2065. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5. ....	62
Figura 24: Projeção para o ano de 2100. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5. ....	63

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da água subterrânea tem se expandido exponencialmente na cidade de Manaus. Do total de poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), aproximadamente 40% foram construídos na última década, enquanto aqueles construídos na década de 1970 representam apenas 1,6%. Os problemas relacionados a cheias, secas e contaminações em áreas urbanas vêm crescendo de acordo com o ritmo de urbanização e afeta significativamente as grandes cidades, especialmente onde o desenvolvimento urbano não ocorreu de forma planejada ou controlada, como é o caso de Manaus. Para entender os efeitos do aumento da utilização da água subterrânea, o conhecimento acerca dos aquíferos deve ser amplo, incluindo suas complexidades físicas, hidrológicas e de utilização (BITTAR, 2013).

Através de modelos é possível estimar a relação entre recarga e descarga dos aquíferos, reversão de fluxo, atuação das diferentes camadas litológicas ante um contaminante, ou sua influência na dinâmica de fluxo. Os processos ambientais são bastante complexos, tipicamente tridimensionais e totalmente dependentes do tempo. Somando-se a esta complexidade, podem ocorrer comportamentos não lineares e componentes estocásticos em diferentes escalas de tempo e espaço (RENNÓ & SOARES, 2003). Deste modo, é imprescindível a utilização da capacidade computacional da modelagem hidrogeológica para envolver a multiplicidade de variáveis, que se efetuada de modo manual tomaria um tempo excessivo e podendo gerar um grau de incerteza elevado, o que levaria por consequência à impossibilidade de sua utilização (STEYAERT, 1993).

Em países em desenvolvimento, nem sempre os recursos necessários à implantação da infraestrutura demandada estão disponíveis. Muitas vezes, torna-se necessário otimizar intervenções e escaloná-las no tempo, conforme a capacidade de investimento (MIGUEZ et al., 2001). São necessárias soluções de cunho sistêmico, adotando a bacia como unidade de planejamento e projeto integrado, o que requer ferramentas computacionais de apoio à decisão e ao desenho de soluções efetivas e, sempre que possível, de caráter sustentável (PORTO & PORTO, 2008). Nesse contexto, a modelagem matemática surge como solução

adequada, por sua capacidade de fornecer respostas sistêmicas para cenários diversos, em um exercício de predição e antecipação de efeitos resultantes de possíveis medidas de projeto. Através da modelagem numérica e possível determinar se há o uso indevido do recurso natural e quais as possíveis fontes de irregularidades; o quanto este recurso está sendo impactado; se e onde ocorre reversão de fluxo de descarga do aquífero; e a configuração da superexploração.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. *Objetivo geral*

O objetivo geral do presente trabalho é compreender o panorama hidrogeológico atual na cidade de Manaus, e quais são os possíveis impactos que podem ocorrer por conta de mudanças futuras.

### 1.1.2. *Objetivos específicos*

- Verificar se as diferentes demandas por água subterrânea podem ser supridas nas condições atuais de uso;
- Executar previsões das consequências das mudanças climáticas no regime hídrico do Aquífero Alter do Chão em Manaus.
- Comparar os futuros cenários avaliando as possíveis transformações ocasionadas por mudanças climáticas como as cheias de 2012 e 2015, as secas de 2010 e 2005, ocasionadas pelos eventos El Niño e La Niña.
- Avaliar os cenários futuros para alterações na disponibilidade hídrica utilizando cenários de acréscimo e decréscimo dos poços tubulares na área urbana da cidade, gerados por previsões de aumento ou diminuição da atividade econômica.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

### 2.1. Localização e caracterização

A área de estudo compreende a zona urbana da cidade de Manaus (Figura 1), que atualmente abrange 337 km<sup>2</sup> (SUFRAMA, 2015). É a cidade mais populosa da região norte, com 2,094 milhões de pessoas, e a sétima mais populosa do Brasil

(IBGE, 2015). Possuía, em 2013, o sexto maior Produto Interno Bruto (PIB) do país (IBGE, 2013), mas apenas o 24º melhor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) entre as capitais (ONU, 2016).

O clima local, segundo a classificação de Köppen, é tropical úmido de monções (tipo Am), sua temperatura média anual é de 26,7°C, com máxima absoluta de 39°C em setembro de 2015 e mínima absoluta de 12,1° em julho de 1961 (INMET, 2014). O índice pluviométrico é em torno de 2.300 mm por ano, com uma umidade média que varia entre 79% e 88%, onde o mês mais chuvoso é março e o menos chuvoso é agosto (INMET, 2014).

Na região de Manaus, o relevo pode ser dividido em cinco faixas delimitadas em função da variação hipsométrica (NAVA, 1999). A primeira faixa inclui elevações até os 25 m, abrangendo os vales dos rios Amazonas, Negro, Cuieiras, Tarumã-açu, Tarumã-mirim, Puraquequara e Preto da Eva, onde são encontradas as grandes planícies de inundações e barras de canal (NAVA, 1999). Entre 25 e 65 m estão os vales e planícies dos rios tributários ao Amazonas e Negro, compostos por terraços fluviais e erosivos. Entre 65 e 90 m os interflúvios com elevado grau de dissecação assumem uma geometria tabular. O intervalo entre 90 e 115 m representa os divisores de drenagem com alinhamento NW-SE e N-S, acima dos 115 m estão os topos tabulares destes divisores, localizados na região nordeste da cidade. A área apresenta declividade baixa, com a inclinação máxima chegando a 18° nas bordas dos terraços fluviais e nas vertentes dos interflúvios alongados (NAVA, 1999).

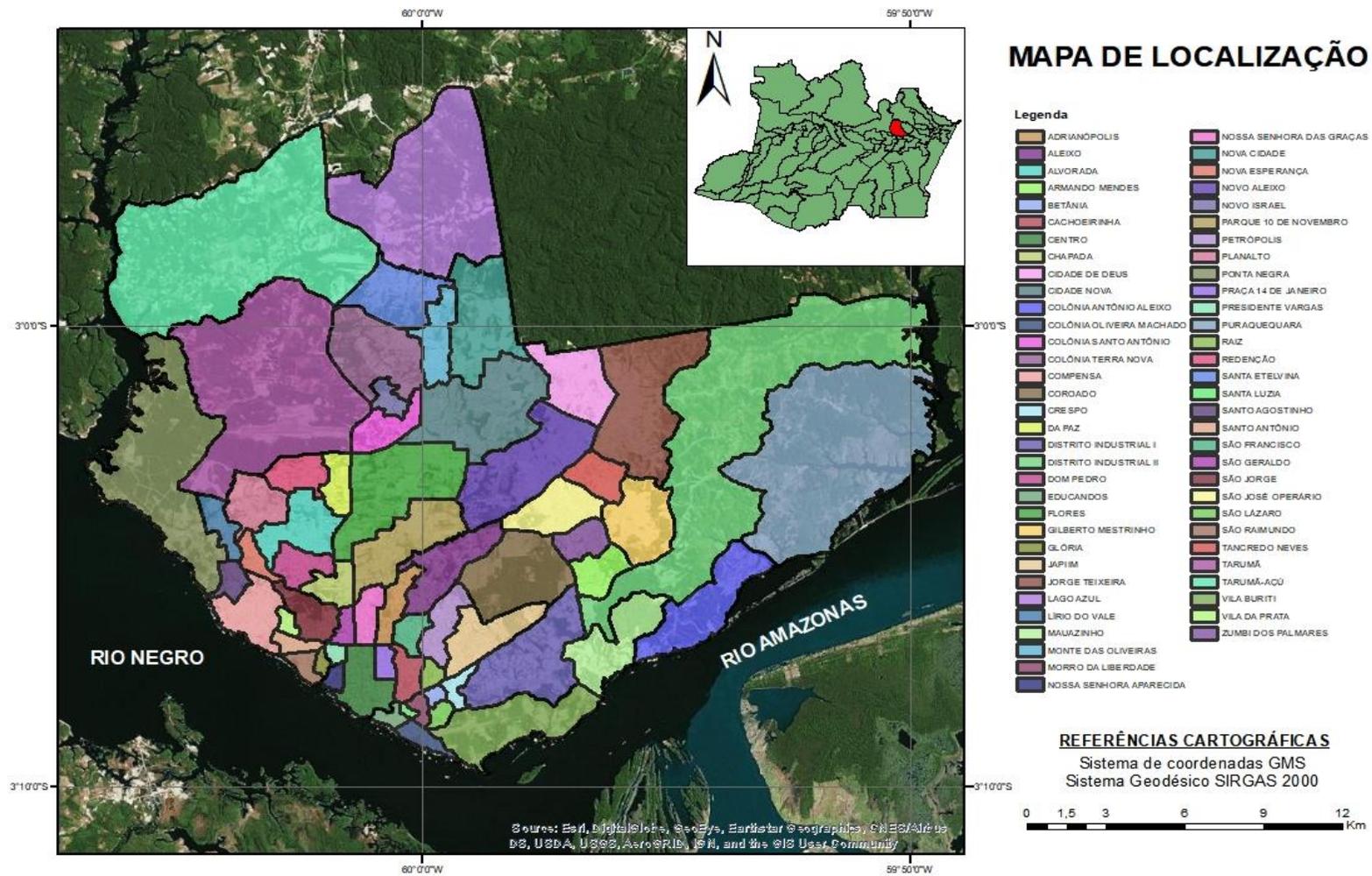


Figura 1: Mapa de localização da área urbana de Manaus.

## 2.2. Contexto geológico

A Bacia Sedimentar do Amazonas (BSA) está situada entre os crátons das Guianas ao norte e Brasil Central ao sul, abrange uma área de mais de 500 mil km<sup>2</sup>, ocupando parte dos estados do Pará e Amazonas. A BSA é limitada pelo Arco de Gurupá a leste e pelo Arco de Purus a oeste (CUNHA et al., 2007).

O substrato sobre o qual se depositou o pacote sedimentar da BSA é composto por rochas metamórficas proterozóicas, que foram acrescentadas a um núcleo central arqueano, chamado Província Amazônia Central (CORDANI et al., 1984).

A evolução deposicional da BSA pode ser dividida em cinco sequências (CUNHA, 2014). O Grupo Trombetas (primeira fase, deposição Ordoviciano-Devoniano) é constituído por folhelhos marinhos, arenitos, diamictitos depositados, durante esta primeira fase, durante a glaciação siluriana que afetou grandes áreas do continente Gondwana (CUNHA et al., 1994). Este grupo é composto pelas formações Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga e Manacapuru. A segunda fase se inicia após a discordância causada pela Orogenia Caledoniana, onde um novo ciclo transgressivo-regressivo ocorreu na bacia, depositando os grupos Urupadi e Curuá (SANTOS et al., 1975). Um ciclo deposicional transgressivo-regressivo entre o Neocarbonífero-Neopermiano deu início à terceira fase. Neste ciclo foi depositado o Grupo Tapajós, com as Formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda (SANTOS et al., 1975). A quarta fase é caracterizada pelo magmatismo básico em todas as bacias sedimentares brasileiras, que na BSA recebe a alcunha de Magmatismo Penatecaua. Na última fase de deposição ocorre a implantação da sequência Cretáceo-Terciária, representada pelo Grupo Javari. Do Neocretáceo ao Neógeno foram depositados os sedimentos da formação Alter do Chão, onde é possível identificar quatro granulometrias distintas: argilosa, areno-argilosa, arenosa e Arenito Manaus. Estas fácies apresentam geometria lenticular e sub-horizontal, de forma geral. Ocorrem pontualmente crostas lateríticas ferruginosas com cerca de um metro de espessura, podendo se estender por dezenas de metros lateralmente. As lentes de Arenito Manaus são compostas por arenitos de granulação fina a média e coloração avermelhada, devido à presença de óxidos de ferro, além de estar extremamente silicificado, sendo subdividido por Palma (2014) em sete fácies:

- Conglomerática maciça: conglomerado maciço de arcabouço aberto, subordinadamente estratificado, em forma de lentes métricas e espessura de 12 a 80 cm.
- Arenítica com estratificação cruzada acanalada: arenitos finos a grossos com estratificação cruzada acanalada, grãos subarredondados a subangulosos, mal a moderadamente selecionados.
- Arenítica com estratificação cruzada tabular: arenitos médios a grossos com estratificação cruzada tabular, mal a moderadamente selecionados.
- Arenítica com estratificação plano-paralela: arenitos finos a médios possuem geometria tabular e estratificação plano-paralela.
- Arenítica maciça: arenitos muito finos a grossos, com rara ocorrência de estratificação cruzada acanalada e bioturbações, apresenta também matéria orgânica com halo amarelo esbranquiçado.
- Arenítica com laminação: arenitos muito finos a médios com laminação cruzada cavalgante subcrítica e laminação plano-paralela subordinada.
- Arenítica Pelítica bioturbada silicificada: pelitos e arenitos muito finos, predominantemente silicificados, com estrutura maciça e rara laminação incipiente.

A fácies argilosa ocorre próximo à superfície, cobrindo 60-70% da área de Manaus. As fácies arenosa e areno-argilosa são mais profundas no perfil.

Segundo Dino et al. (2012) e Soares et. al (2016), sobreposta à Formação Alter do Chão e ocupando uma área que vai desde o norte da cidade de Manaus até o município de Itacoatiara, e ao longo dos bancos esquerdos do Rio Amazonas desde Manacapuru até Itacoatiara, está a Formação Novo Remanso, ainda em discussão a respeito de sua espessura e distribuição espacial, de idade miocena. Segundo os autores esta Formação possui espessura variando entre 10 e 80 m, e é composta por arenitos ferruginosos de granulometria fina a grossa, com estratificação cruzada tabular, intercalados por argilitos. Esta Formação é interpretada como tendo sido depositada em um paleossistema fluvial meandrante.

PERÍODO	ÉPOCA	IDADE	Bacia do Amazonas (Playford & Dino 2000, Soares 2007, Dino et al. 2012, Gonçalves Jr. 2013) Arco de Paris Arco de Garupá
	HOLOCENO		Colúvios/soles antropogênicos
NEÓGENO	PLEISTOCENO	SUPERIOR	Terraço fluvial
		MÉDIO	Paleossolo laterítico-Sd3
		INFERIOR	
		GELASIANO	
PLIOCENO			
MIOCENO			Formação Novo Remanso (Superior)
			Paleossolo laterítico - Sd2
			Formação Novo Remanso (Inferior)
PALEÓGENO	OLIGOCENO		Paleossolo laterítico-Sd1 (S2)
	EOCENO		
	PALEOCENO		
CRETÁCEO	SUPERIOR/ INFERIOR	CENOMANIANO APTIANO	Formação Alter do Chão
			S1
PERMIANO/ CARBONIFERO	PRÉ-CRETÁCEO/ PENSILVÂNICO		Formação Andirá/ Formação Nova Olinda

Figura 2: Coluna estratigráfica do Paleozóico, Cretáceo, Paleógeno e Neógeno da porção Central da Bacia do Amazonas, e os limites estratigráficos identificados pelas superfícies de erosão, denominados informalmente de Sd1, Sd2 e Sd3 por Soares, 2007. (SOARES ET AL, 2016).

### 2.3. Modelo conceitual hidrogeológico

A formação Alter do Chão na cidade de Manaus é composta por arenitos, que variam de muito fino a grosso, de mal a bem selecionados (TAVARES et al., 2017). Os arenitos possuem geometria tabular, enquanto as intercalações de argilitos e siltitos possuem geometria lenticular (TAVARES et al., 2017).

Na cidade de Manaus, o Aquífero Alter do Chão possui uma espessura saturada estimada em 160 m, com profundidade do nível d'água de aproximadamente 30 m (SOARES; WAHNFRIED; DINO, 2016), e uma variação anual de 3,5 m (BRASIL, 2002). As maiores profundidades do nível de água estão na porção oriental da

cidade, enquanto a zona ocidental apresenta os níveis mais rasos (BRASIL, 2012). A direção local de fluxo de água ocorre de nordeste para sudoeste (BRASIL, 2012). A transmissividade média definida para a área da cidade é de 4,68 m<sup>2</sup>/h, condutividade hidráulica média de 0,288 m/h (figura 4), porosidade efetiva de 18% e velocidade linear média em torno de 0,000828 m/h (BRASIL, 2012). Existem aproximadamente 3.800 poços cadastrados atualmente no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), com vazões entre 10,8 e 3,24 m<sup>3</sup>/h (SOUZA, 2005). A descarga total destes poços era de 5.796 m<sup>3</sup>/h no ano de 2005 (SHAFT CONSULTORIA, 2005), retirando um total de 30.528 m<sup>3</sup>/h de água do Aquífero.

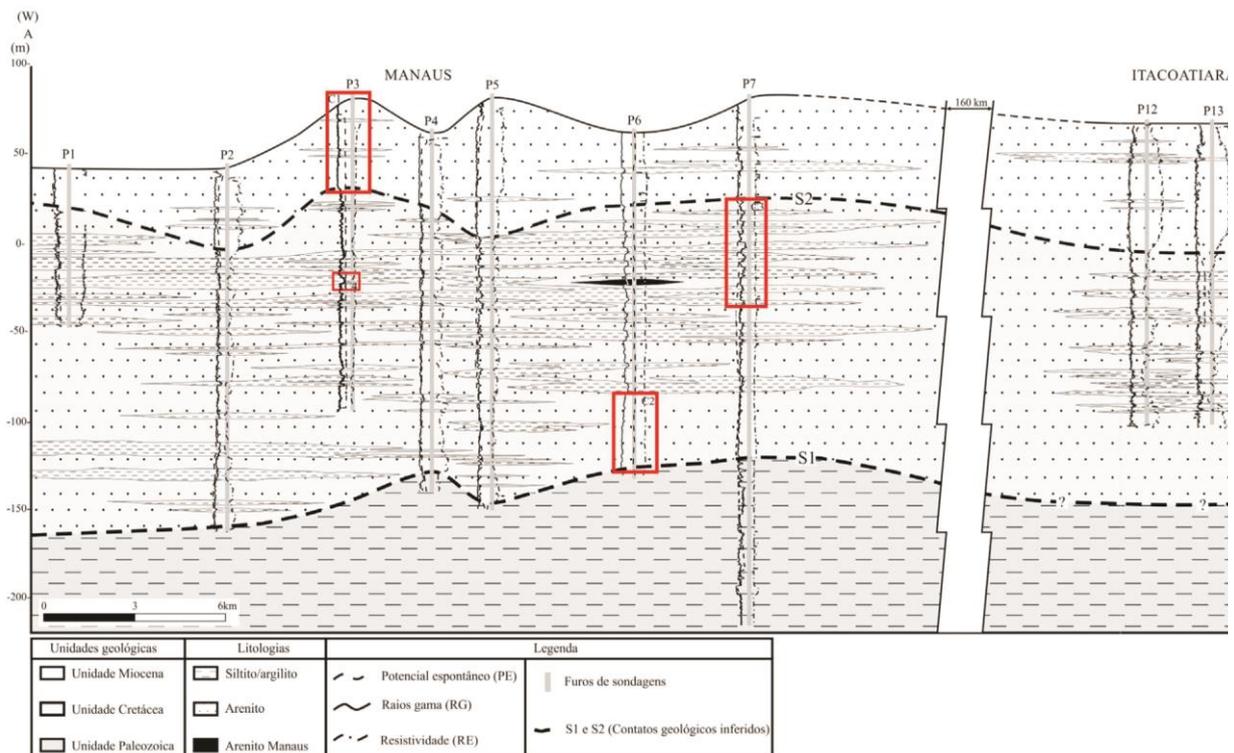


Figura 3: Seção geológica entre Manaus e Itacoatiara, mostrando a relação geométrica entre as litologias ao longo do perfil (SOARES; WAHNFRIED; DINO, 2016).

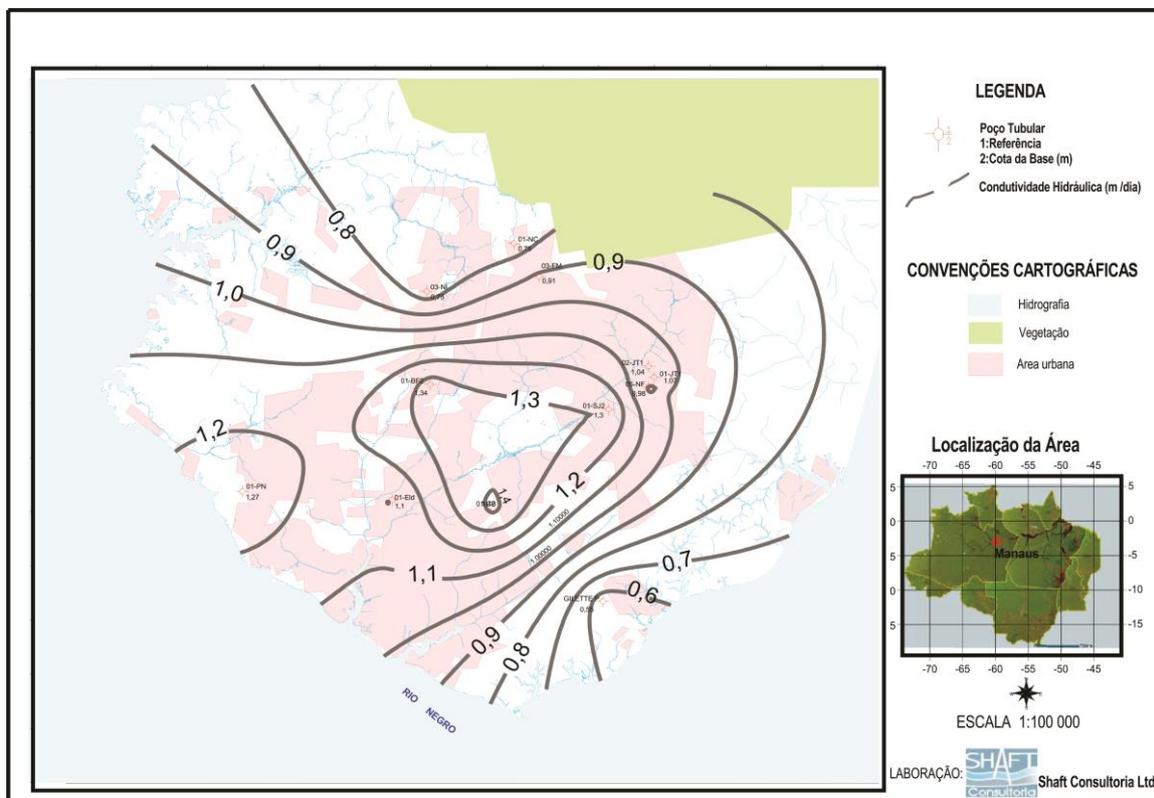


Figura 4: Zoneamento de condutividade hidráulica (SHAFT, 2005).

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Aquíferos

Água subterrânea é a água que ocorre nos poros e fraturas no solo e rochas na zona vadosa e na zona saturada (FITTS, 2012). O nível de água (nível freático, lençol freático ou superfície freática) é definido como o nível em que a pressão da água é igual à pressão atmosférica, ou uma superfície limítrofe entre a zona saturada e a zona vadosa (insaturada) (FITTS, 2012). Na zona saturada, os poros e fraturas estão preenchidos apenas com água, enquanto na zona insaturada, os poros estão preenchidos com água e ar.

Os aquíferos podem ser divididos em duas categorias: livres e confinados. Aquíferos confinados são limitados em seu topo por um aquitarde. O nível de água de um poço que penetra o aquífero confinado será mais elevado que o topo da camada aquífero (Figura 5). Caso a coluna hidrostática seja tão elevada a ponto do

nível de água ultrapassar a superfície do terreno, esse aquífero é chamado artesiano (FITTS, 2012).

Os aquíferos livres ou freáticos são comumente encontrados próximos à superfície do terreno. Em um aquífero freático onde não há fluxo vertical o nível de água coincidirá com a coluna hidrostática. Se há infiltração, o nível de água nas porções mais profundas será maior que a coluna hidrostática. Se o fluxo é ascendente, o nível de água será menor que a coluna hidrostática (FITTS, 2012).

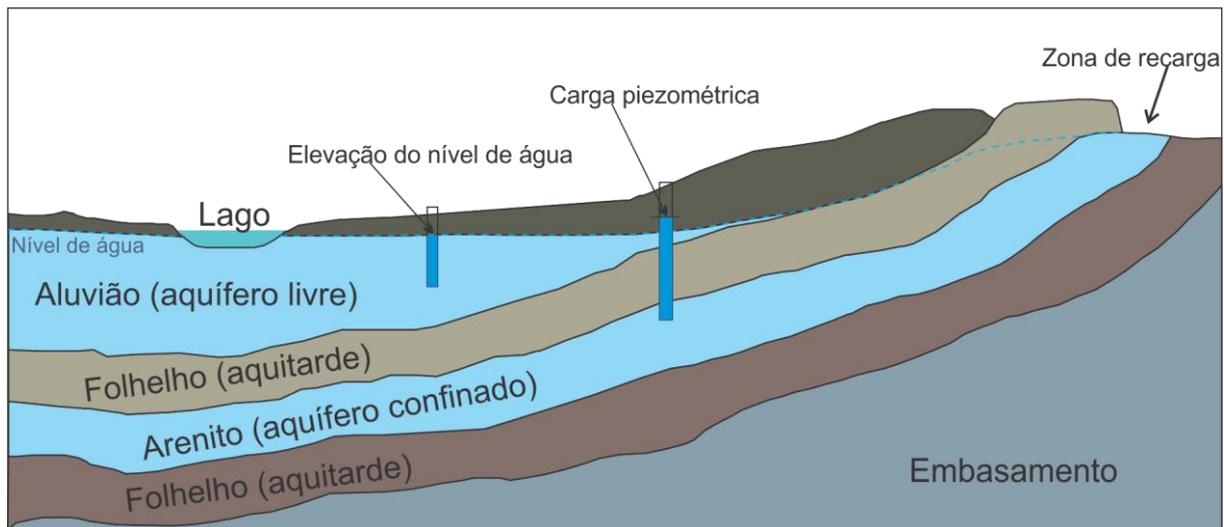


Figura 5: Seção cruzada de um sistema com aquífero livre e confinado (modificado de FITTS, 2012).

### 3.2. Propriedades físicas da água

Para compreender como ocorre o armazenamento e a movimentação da água subterrânea, é necessário conhecer tanto as suas propriedades físicas quanto aquelas dos meios por onde ela se propaga. A água subterrânea em seu estado é composta dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio ( $H_2O$ ), com íons e moléculas residuais dissolvidas. As propriedades físicas da água (tabela 1) se manifestam nessa escala molecular (FITTS, 2012).

Tabela 1. Propriedades físicas da água de acordo com as condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Propriedade	Símbolo	Valor
Densidade	$\rho_w$	1 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico	$\rho_w g$	9.810 N/m <sup>3</sup>
Compressibilidade	B	4,5 x 10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> /N
Viscosidade dinâmica	$\mu$	1,4 x 10 <sup>-3</sup> N-s/m <sup>2</sup>

### 3.2.1. Densidade e compressibilidade

A densidade da água varia de forma tênue de acordo com a temperatura, a pressão e a presença de solutos dissolvidos na água. A densidade da água pura na pressão atmosférica varia entre 0,998 e 1,000 g/cm<sup>3</sup>, considerando a faixa de temperatura mais frequente em água subterrânea acessada por poços (0°C a 20°C). Líquidos normalmente possuem densidade inversamente proporcional à temperatura, devido ao aumento dos movimentos moleculares, facilitando com que as forças de atração sejam contornadas, em sua maior parte. No caso da água, a densidade máxima não ocorre à temperatura de congelamento, mas a 4°C (FITTS, 2012).

A compressibilidade da água é finita, e suficientemente baixa para ser desprezada em situações comuns de extração de aquíferos. À medida que a pressão da água (P) aumenta por uma variação dP em temperatura constante, a densidade da água aumenta proporcionalmente a uma taxa  $d\rho_w$  a partir de sua densidade original  $\rho_w$ , e determinado volume de água  $V_w$  diminuirá em volume por  $dV_w$  de acordo com:

$$\beta dP = \frac{d\rho_w}{\rho_w} \quad (\text{Equação 1})$$

$$= -\frac{dV_w}{V_w}$$

Onde  $\beta$  é a compressibilidade isotérmica da água, que varia entre 4,9 e 4,5 x 10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/N, para 0°C e 20°C respectivamente (STREETER & WYLIE, 1979).

### 3.2.2. Viscosidade

A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, a uma dada temperatura. Quanto mais viscoso é um fluido, maior é sua resistência ao fluxo. A resistência à deformação interna faz com que a água resista em fluir pelos materiais geológicos. Para fluir por poros ou fraturas, a água precisa mudar de forma e se deformar enquanto flui. De acordo com a Equação 2 a resistência viscosa aumenta na proporção inversa ao tamanho dos poros do material por onde flui (FITTS, 2012).

$$F = A\mu \frac{dv}{dz} \quad (\text{Equação 2})$$

F é a força de resistência; A é a área;  $\mu$  é a viscosidade dinâmica; dv é a velocidade de deslocamento das superfícies e dz é a espessura do fluido que separa as superfícies

### 3.2.3. Tensão superficial e capilaridade

A polaridade é a separação das cargas elétricas de uma molécula, fazendo com que ela ou um agrupamento delas formem dipolos elétricos, agindo como ímãs. As massas de água têm uma coesão interna que faz com que tendam a se manter unidas. Esta propriedade faz com que as gotas de água tendam a formar esferas enquanto gotas de chuva, e também faz com que tendam a permanecer juntas sobre uma superfície. O nome tensão superficial foi atribuído ao comportamento gerado pela fina membrana que parece ser formada numa interface ar-água. Sobre uma rocha, a água molhará as superfícies minerais, deixando as partes centrais dos poros expostos diretamente ao ar (DE MARSILY, 1986).

Uma camada de moléculas de água na ordem de 0,1 a 0,5  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m) de espessura é atraída às superfícies minerais e permanece predominantemente imóvel. As forças de atração são mais fortes para minerais argilosos, devido à presença de elétrons disponíveis na superfície do mineral (DE MARSILY, 1986).

A atração da água às superfícies minerais faz com que ela se espalhe, gerando uma pressão dentro da água inferior à pressão do ar dentro dos poros. À medida que a quantidade de água presente diminui, ela fica mais dispersa na superfície do mineral, fazendo com que a interface ar-água tome a forma da superfície dos grãos.

Esta atração da água às superfícies minerais em materiais parcialmente saturados é chamada de capilaridade (DE MARSILY, 1986).

### 3.3. Propriedades dos meios porosos

O meio poroso é composto por um sólido que apresenta aberturas não preenchidas por este sólido, onde a porção com presença dos sólidos é chamada de matriz e a porção com ausência destes são os poros, que podem ser preenchidos com um fluido, líquido ou gás. A principal característica a ser descrita para definir um meio poroso é sua porosidade. As outras características como permeabilidade, transmissividade e condutividade hidráulica podem ser derivadas a partir das propriedades de seus constituintes, matriz e fluidos (FITTS, 2012).

#### 3.3.1. Porosidade

A porosidade ( $n$ ) de uma rocha ou solo (tabela 2) é a fração do volume de material que é espaço poroso, matematicamente definida como:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde  $V_v$  é o volume de vazios em um volume total de material  $V_t$ , resultando em um valor adimensional no intervalo  $0 < n < 1$ . Pode ser expressa como porcentagem de vazios em relação ao volume total (FITTS, 2012).

Tabela 2: Valores médios de porosidade para rochas (FITTS, 2012).

<b>Material</b>	<b>n (%)</b>
<b>Cascalho, areia e silte mal selecionados</b>	30-50
<b>Cascalho, areia e silte bem selecionados</b>	20-35
<b>Argila, silte</b>	35-60
<b>Arenito</b>	5-30
<b>Calcário dolomítico</b>	0-40
<b>Xisto</b>	0-10
<b>Rocha cristalina</b>	0-10
<b>Granito maciço</b>	0-0,5

### 3.3.2. Tamanho do grão

O tamanho e grau de seleção dos grãos vão determinar quanto espaço de poros está disponível para conter água e com que facilidade a água é transmitida pelo material. A distribuição de tamanhos de grãos de um material inconsolidado (tabela 3) é medida passando o material por crivos alinhados em peneiras de diferentes tamanhos (FITTS, 2012).

Tabela 3: Distribuição granulométrica em sedimentos inconsolidados (FITTS, 2012).

Material	Faixa de tamanho dos grãos (mm)
Argila	<0,002
Silte	0,002-0,05
Areia	0,05-2,0
Cascalho	>2,0

## 3.4. Interação entre as propriedades dos meios porosos e as propriedades físicas da água – Princípios de fluxo

### 3.4.1. Lei de Darcy e condutividade hidráulica ( $K$ )

Henry Darcy, um engenheiro francês, fez um estudo sistemático sobre a movimentação de água em meios porosos, com o intuito de filtrar a água de um reservatório para abastecimento público. Em laboratório ele realizou experimentos para analisar os fatores que controlam a taxa de fluxo da água ao utilizar a areia para a filtragem, em um experimento realizado em laboratório (figura 6). Seus resultados permitiram obter as equações básicas do fluxo de águas subterrâneas em meios granulares. Essas equações são fundamentais para a melhor compreensão da dinâmica das águas subterrâneas, através de cálculos mais precisos e posteriormente a possibilidade do modelamento destes recursos, entre as quais a principal é hoje conhecida como Lei de Darcy (Equação 4).

O dispositivo de Darcy (Figura 6) consiste em uma coluna preenchida por areia, com uma entrada e uma saída de água. Dois manômetros medem a coluna hidrostática em dois pontos ( $h_1$  e  $h_2$ ). A amostra deve estar saturada e um fluxo constante é gerado em função da diferença de pressão entre o ponto de entrada e o ponto de saída, resultando em uma taxa de vazão  $Q$ . Darcy descobriu que  $Q$  era

proporcional à diferença de coluna  $\Delta h$  entre os dois manômetros, e inversamente proporcional à distância entre os manômetros,  $\Delta s$ . Esta proporção é linear, fazendo com que a relação entre vazão e o gradiente definido por  $\Delta h/\Delta s$  seja constante para um determinado material, contanto que a velocidade do fluxo de água esteja dentro dos limites de fluxo laminar. A esta constante Darcy deu o nome de condutividade hidráulica ( $K$ ). Além disso, vazão  $Q$  é proporcional à área transversal da coluna  $A$ .

$$Q = -K \frac{dh}{ds} A \quad (\text{Equação 4})$$

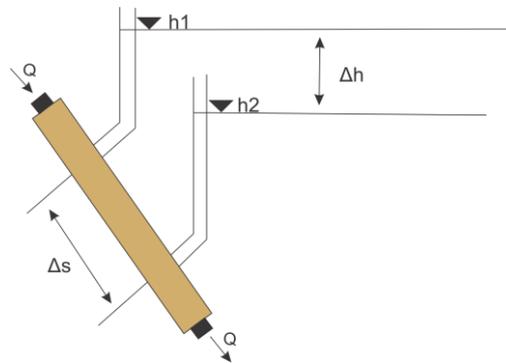


Figura 6: Diagrama do experimento elaborado por Henry Darcy para descrever o fluxo de um fluido através de um meio poroso (modificado de FREEZE & CHERRY, 1979).

### 3.4.2. Transmissividade ( $T$ )

A transmissividade é a medida da quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente através do comprimento da espessura saturada total do aquífero sob gradiente hidráulico unitário (FETTER, 2001). A transmissividade é produto da condutividade hidráulica e da espessura saturada do aquífero:

$$T = Kb \quad (\text{Equação 5})$$

### 3.4.3. Vazão específica

A vazão específica é a quantidade de água extraída de um aquífero livre, por unidade de rebaixamento do nível de água, expresso em  $(m^3/h/m)$ . O valor indica maior ou menor potencialidade do poço como produtor de água (FETTER, 2001).

### 3.4.4. Armazenamento específico ( $S_s$ )

O armazenamento específico ( $S_s$ ) é a quantidade de água obtida por unidade de volume de uma formação saturada com um rebaixamento unitário do nível de água. A saída da água ocorre por causa da compressibilidade do material (FETTER, 2001). Pode ser definida matematicamente como:

$$S_s = -\frac{dV_w}{V_t} \frac{1}{dh} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde  $dV_w$  é o volume de água expelida do volume  $V_t$  do aquífero, enquanto a coluna hidrostática varia em  $dh$ .

### 3.5. Gestão de quantidade

Aquíferos desempenham várias funções, sendo a mais evidente e importante para a sociedade o fornecimento de água por meio de poços e cacimbas. Um dos problemas mais críticos na gestão das águas subterrâneas tem sido determinar a quantidade de água que um aquífero pode fornecer.

O conceito de sustentabilidade usado no contexto de desenvolvimento dos recursos naturais pela comissão Brundtland (BRUNDTLAND ET AL., 1987), responsável pela elaboração do documento intitulado “Nosso Futuro Comum”, uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido em nações em desenvolvimento, baseada no princípio do balanço hídrico em equilíbrio, também é usado para definir superexploração (CUSTODIO, 2000). Entretanto, Custodio (2000) argumenta que o conceito é muito amplo e não pode ser aplicado a situações locais específicas, desconsiderando a impossibilidade da reciclagem completa da matéria. Outra divergência apontada por Custodio (2000) é que, seguindo estritamente o conceito de desenvolvimento sustentável como proposto pela comissão, os recursos não-renováveis como os grandes aquíferos confinados em regiões áridas não poderiam ser utilizados em benefício da população.

Diversos autores (ITGE, 1991; CUSTODIO, 1992 & 2000; DELGADO, 1992; MARGAT, 1992) argumentam que o conceito de utilização em excesso ou a superexploração de um aquífero não é simples, como uma questão apenas de balanço hídrico, mas uma relação complexa de fatores que geram consequências indesejadas, podendo elas ser físicas, sociais, econômicas, ecológicas, ambientais

e éticas. A percepção de tais fatores é variável de acordo com a percepção da sociedade em uma determinada época (CUSTODIO, 2000).

O termo superexploração foi alvo de definição por parte de alguns autores, tentaram também evoluir os critérios para identificar os graus de sobre-uso. As regulamentações do Domínio Público de Água, do Ato Espanhol de Águas (LLAMAS & CUSTODIO, 1985) definem a superexploração pelos seus efeitos: um aquífero é considerado superexplorado ou em risco de superexploração quando a sustentabilidade dos usos existentes é ameaçada como consequência da extração ser maior, ou próximo ao volume médio anual dos recursos renováveis, ou quando podem produzir sérios problemas de deterioração na qualidade da água (CUSTODIO, 2000). Young (1992) definiu superexploração de acordo com uma visão econômica, separando as taxas de bombeamento dos valores médios de recarga, classificando como uma “exploração não-otimizada” aquela em que os custos para a extração superam a vantagem econômica recebida pela extração do bem. A superexploração depende da análise de diferentes pontos de vista como, administradores dos recursos hídricos, ecólogos, mídia, cidadãos, e profissionais como geólogos, engenheiros, economistas, especialistas em gestão, ambientalistas, advogados, sociólogos, fazendeiros e políticos.

Llamas (1992) introduziu a noção estrita de superexploração, abrindo espaço para definições de espectro mais amplo como a extração de água produzindo efeitos cujo balanço final é negativo para o presente e futuras gerações, levando em conta aspectos físicos, químicos, econômicos, ecológicos e sociais.

Definir e analisar o uso excessivo de água subterrânea é difícil e complexo, não podendo ser limitado à simples formulações (CUSTODIO, 2000). De acordo com Custodio (2000), as razões são as seguintes:

- Variação sazonal da percepção das pessoas, ocasionada geralmente pela flutuação do nível de água em épocas de chuva e estiagem, que podem levar a mudanças físicas, químicas e econômicas da água;
- O argumento da tendência do decréscimo em longo prazo da quantidade de chuvas devido às mudanças climáticas;
- Diminuição do nível de água por superexploração;

- A variação da definição do termo superexploração através do tempo e espaço;
- Dificuldade em analisar variações a longo-prazo na taxa de recarga;
- Importância de efeitos locais no panorama geral;
- Mudança nas percepções e prioridades sociais;
- Avanços tecnológicos no uso da água;
- Natureza complexa do cálculo custo-benefício.

Portanto, a superexploração de um aquífero pode ser definida como a retirada de água em excesso de um aquífero, de tal modo que gere prejuízos econômicos, sociais e/ou ambientais ao longo do tempo em que os passivos continuem sendo identificados.

Os recursos hídricos subterrâneos no Brasil desempenham um papel sócio econômico importante, levando em consideração seu uso no abastecimento público e privado de diversas cidades do país, sua utilização nas indústrias e o auxílio em momentos de crise hídrica. Desta forma, se tornarão cada vez mais importantes à medida que o clima muda e o homem contamina os recursos hídricos superficiais. Há um aumento significativo da evidência de superexploração dos aquíferos em várias localidades brasileiras (SHAFT, 2005; BERTOLO et al., 2015; CHATTON et al., 2016; HIRATA et al., 2012), gerando impactos negativos como a diminuição no suprimento de água potável, aumento no custo da extração de água dos poços, aumento da desigualdade de acesso ao uso do recurso, degradação ecológica, redução do nível de água e intrusão de cunha salina.

Tais efeitos podem ser identificados através de técnicas como o modelamento hidrogeológico.

### 3.6. Modelagem numérica aplicada à hidrogeologia

Segundo Anderson & Woessner (1992), um modelo numérico hidrogeológico é qualquer método computacional que represente uma aproximação de um sistema de água subterrânea. Modelos são por definição uma simplificação de uma realidade mais complexa.

A hidrologia como ciência começou com a conceitualização do ciclo hidrológico pelos filósofos gregos, principalmente Anaxágoras de Clazomenae e Theophrastus, que elaborou um modelo do ciclo hidrogeológico e explicou a formação da precipitação por condensação e congelamento. Durante a Renascença uma mudança gradual ocorreu, de apenas conceitos filosóficos para a ciência observacional como, por exemplo, Leonardo da Vinci. No século XVIII as medições hidráulicas e experimentos foram popularizados após a formulação da equação de Bernoulli e da fórmula de Chezy. A hidrologia avançou rapidamente durante o século XIX, quando Darcy desenvolveu sua lei de fluxo de água em meios porosos em 1856, e Manning elaborou sua fórmula de fluxo em canal aberto (1891) (ESSINK, 2000).

No entanto, a hidrologia quantitativa permanecia imatura no início do século XX. Gradualmente o empirismo foi sendo substituído pelas análises racionais e observação de dados. Por exemplo, Sherman (1932) idealizou um método para transformar a pluviosidade efetiva em escoamento direto. Durante as últimas décadas o objeto de interesse da sociedade na hidrologia mudou. Duas décadas atrás o interesse principal era de natureza quantitativa: Qual a quantidade de água disponível; quanto pode ser extraído; quais são os efeitos na coluna piezométrica, entre outros. Atualmente, a qualidade vem se tornando cada vez mais importante, como a poluição da água superficial e subterrânea (ESSINK, 2000).

A evolução dos mecanismos computacionais permite um aumento nível de detalhe das análises em áreas cada vez maiores. Teorias complexas de processos hidrológicos podem ser aplicadas usando simulações computacionais. Um exemplo é a possibilidade de inserção da interação entre a água superficial e subterrânea em termos qualitativos e quantitativos nos modelos. No fim do século XX, com os avanços tecnológicos em eletrônica e transmissão de dados fez-se possível o desenvolvimento de programas de monitoramento e gestão em tempo real (ESSINK, 2000).

Os modelos numéricos hidrogeológicos são estruturados basicamente em uma malha de diferenças finitas, condições de contorno, fontes de entrada de água no sistema (zonas de recarga, rios, vazamentos em tubulações) e mecanismos de retirada de água (descarga de poços, descarga do aquífero em um rio ou mar).

### 3.6.1. Condições de contorno

As condições de contorno são necessárias para definir como uma região específica do modelo vai interagir com todo o sistema de fluxo. Ocorrem sempre nos limites da área modelada e atribuem uma parte do código computacional a uma célula ou conjunto de células específicas. Essas condições são as principais responsáveis por definir como o fluxo ocorre no sistema e acaba por ser uma das maiores fontes de erros em modelos. As condições de contorno podem ser de três tipos, definidos com base na disponibilidade de dados, de acordo com Anderson & Woessner (2002):

- Contorno de coluna especificada (Condição de Dirichlet): onde o valor da coluna hidrostática é dado;
- Contorno de fluxo especificado (Condição de Neumann): onde o fluxo através da condição de contorno é informado;
- Contorno de fluxo dependente da coluna hidrostática (Condição de Cauchy): nesta condição o fluxo é calculado através da coluna hidrostática definida em uma condição de contorno. Pode ser chamada de Condição Mista, por que relaciona a coluna hidrostática com o fluxo.

Outras variáveis inseridas no modelo, que controlam a maneira como o fluxo de água se propaga no aquífero, são:

- Condutividade hidráulica (K): é uma medida da facilidade com que um meio transmite água (FITTS, 2012).
- Armazenamento (S): é a quantidade de água liberada pelo aquífero por área unitária da superfície e por declínio unitário da coluna hidrostática (FITTS, 2012).
- Coluna hidrostática (h): medida específica da pressão de um líquido sobre um *datum* geodésico, expresso geralmente em unidades de comprimento (FITTS, 2012).
- Recarga: água na zona insaturada que se move para baixo e flui para zona saturada (FITTS, 2012).
- Descarga: É a taxa de fluxo volumétrica de água que é retirada de um aquífero.

- Córregos: Condição de contorno inserida para representar os rios pequenos, no caso deste modelo, representando os igarapés.

#### **4. SOFTWARE GROUNDWATER VISTAS (GwV)**

O Groundwater Vistas foi o software escolhido para o desenvolvimento deste estudo. Trata-se de um programa de modelamento hidrogeológico desenvolvido para o sistema operacional Microsoft Windows, que inclui um sistema de design de modelos, com uma interface gráfica com o usuário, e códigos como o MODFLOW, MODFLOW2000, MODPATH e PEST. O GwV apresenta modelos tridimensionais. O resultado dos modelos é apresentado utilizando contornos, sombreados, vetores de velocidade e análises detalhadas do balanço de massa. Um aspecto importante deste programa é a condição independente dos limites da malha, onde qualquer alteração no interior da malha não influencia nas células que limitam a área de modelamento, o que permite fazer amplas discretizações, sem precisar reparar o contorno dos limites. A malha é composta por um conjunto de linhas e colunas, formando células. A célula é a unidade fundamental para o processo de modelamento, uma vez que é nela que são inseridas as informações, como condutividade hidráulica, armazenamento específico e coluna hidrostática, entre outras. Através das equações de fluxo descritas em seguida, o software interpola as informações presentes em cada célula da área determinada e gera um modelo de fluxo subterrâneo a partir das informações dos parâmetros hidráulicos inseridos no modelo.

O GwV foi projetado para ser um sistema de modelo onde é possível utilizar uma gama de modelos hidrogeológicos elaborados por pesquisadores e institutos distintos em apenas um programa.

##### **4.1. Software de cálculo de fluxo**

###### **4.1.1. MODFLOW**

O MODFLOW é um modelo de fluxo com uma malha de diferença finita, desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). O programa resolve numericamente uma equação de fluxo para um meio poroso tri-dimensional (MCDONALD & HARBAUGH, 1988). Foi projetado para ter uma estrutura modular

que facilitasse seus dois objetivos principais: auxiliar no entendimento e propiciar o acréscimo de funcionalidades. Para o USGS se fazia necessário facilitar o entendimento porque os técnicos da instituição acreditavam que o modelador precisa entender como um modelo funciona, para usá-lo de maneira adequada (HARBAUGH et al., 2000). O aperfeiçoamento do programa era um objetivo porque a necessidade de novas habilidades demandadas do programa era contínua. Exemplos de aperfeiçoamentos são descritos por Prudic (1989), Hill (1990), Leake e Prudic (1991), Goode e Appel (1992), Harbaugh (1992), McDonald et al., (1992), Hsieh e Freckleton (1993), Leake et al., (1994), Fenske et al., (1996) e Leake e Lilly (1997).

A equação parcial diferencial que descreve o fluxo de água em estado transiente utilizada no MODFLOW para um aquífero confinado é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

- $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  são os valores da condutividade hidráulica ao longo dos eixos de coordenada x, y e z;
- $h$  é altura da coluna hidrostática em relação a um datum;
- $W$  é o fluxo volumétrico por unidade de volume, representando fontes ou escoamento de água, onde valores negativos são extrações e positivos são injeções;
- $S_s$  é o armazenamento específico do material poroso;
- $t$  é o tempo.

A forma de diferenças finitas da equação diferencial parcial de fluxo de água em um domínio de aquífero discretizado, usando linhas, colunas e camadas, é:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CC_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \end{aligned} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

- $h_{i,j,k}^m$  é a coluna hidráulica na célula i,j,k no passo m;
- CV, CR e CC são as condutâncias hidráulicas entre o nó i, j, k e os nós adjacentes;
- $P_{i,j,k}$  é a soma dos coeficientes da carga hidráulica da fonte e da saída;
- $Q_{i,j,k}$  é a soma das vazões constantes da fonte e da saída, onde  $Q_{i,j,k} < 0$  ocorre quando há retirada de água do sistema aquífero e  $Q_{i,j,k} > 0$  ocorre quando há entrada de água no sistema;
- $Ss_{i,j,k}$  é o armazenamento específico;
- $\Delta r_j, \Delta c_i, \Delta v_k$  é a dimensão das células i, j, k, que quando multiplicados representam o volume da célula;
- $t^m$  é o tempo em m.

O modelo possui duas limitações principais: 1) não é possível inserir valores distintos de densidade, viscosidade dinâmica e temperatura da água no modelo; 2) os principais componentes de anisotropia são ortogonais apenas, o que não representa a maior parte do fluxo em fraturas, que é predominantemente não ortogonal (LEAKE E LILLY, 1997).

#### 4.1.2. MODFLOW 2000

O MODFLOW foi originalmente concebido para ser um modelo de fluxo de água subterrânea. A adição de transporte e geração de estimativas de parâmetros foi feita de maneira indireta, com a instalação de novos pacotes. Essas capacidades requereram a resolução de diversas equações de fluxo subterrâneo, bem como a resolução das equações já adicionadas. Desta forma, o MODFLOW foi separado em MODFLOWP e MOC3D para transporte e parâmetros de estimação, tornando o uso e o suporte técnico mais difícil. Para combinar todas essas habilidades em um único programa, permitindo um desenvolvimento e usos mais fáceis, foi criado código que inclui fluxo subterrâneo, transporte e geração de estimativas de parâmetros. Para facilitar a integração, uma expansão de design modular foi necessária. O resultado foi o MODFLOW 2000 (HARBAUGH ET AL, 2000).

## 4.2. Software para cálculo do transporte de partículas

### 4.2.1. MODPATH

O MODPATH é um modelo de rastreamento de partículas utilizado no pós-processamento, que computa os padrões de fluxo com base no modelo gerado pelo MODFLOW. O programa utiliza um rastreamento de partícula semi-analítico, que permite analisar o fluxo de uma partícula em cada célula da malha de diferenças finitas, até que chegue a um limite ou uma região de extração interna ao modelo (USGS, 2016).

## 4.3. Software de calibração

### 4.3.1. PEST

PEST é o nome dado a um conjunto de programas que fazem a calibração e a análise de incertezas em modelos numéricos de diversas naturezas. A principal motivação para seu desenvolvimento foi providenciar um mecanismo de calibração de modelos independente do código original do MODFLOW, podendo assim ser utilizado em qualquer modelo, interagindo com os arquivos finais de entrada e saída (YOUNG et al., 2010). Desde seu início em 1994, o PEST recebeu três pacotes para geração de estimativas de parâmetros:

- OSTRICH desenvolvido por Shawn Mattot da Universidade de Waterloo, Ontário, Canadá.
- AUTOCAL desenvolvido por Henrik Madsen da DHI, empresa dinamarquesa.
- UCODE desenvolvido por Eileen Poeter e Mary Hills do USGS, EUA.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os modelos hidrogeológicos são uma boa ferramenta para a avaliação do uso sustentável de um aquífero, pois geram e permitem a visualização de informações que não são facilmente obtidas por meios físicos, além de permitir a utilização de grandes quantidades de dados e equações para gerar projeções futuras, exibindo os resultados de modo intuitivo.

A elaboração de um modelo hidrogeológico deve seguir um rígido protocolo de modelamento (Figura 7) para que a finalidade justifique o processo, o processo seja organizado, os resultados confiáveis e que o trabalho possa ser replicado.

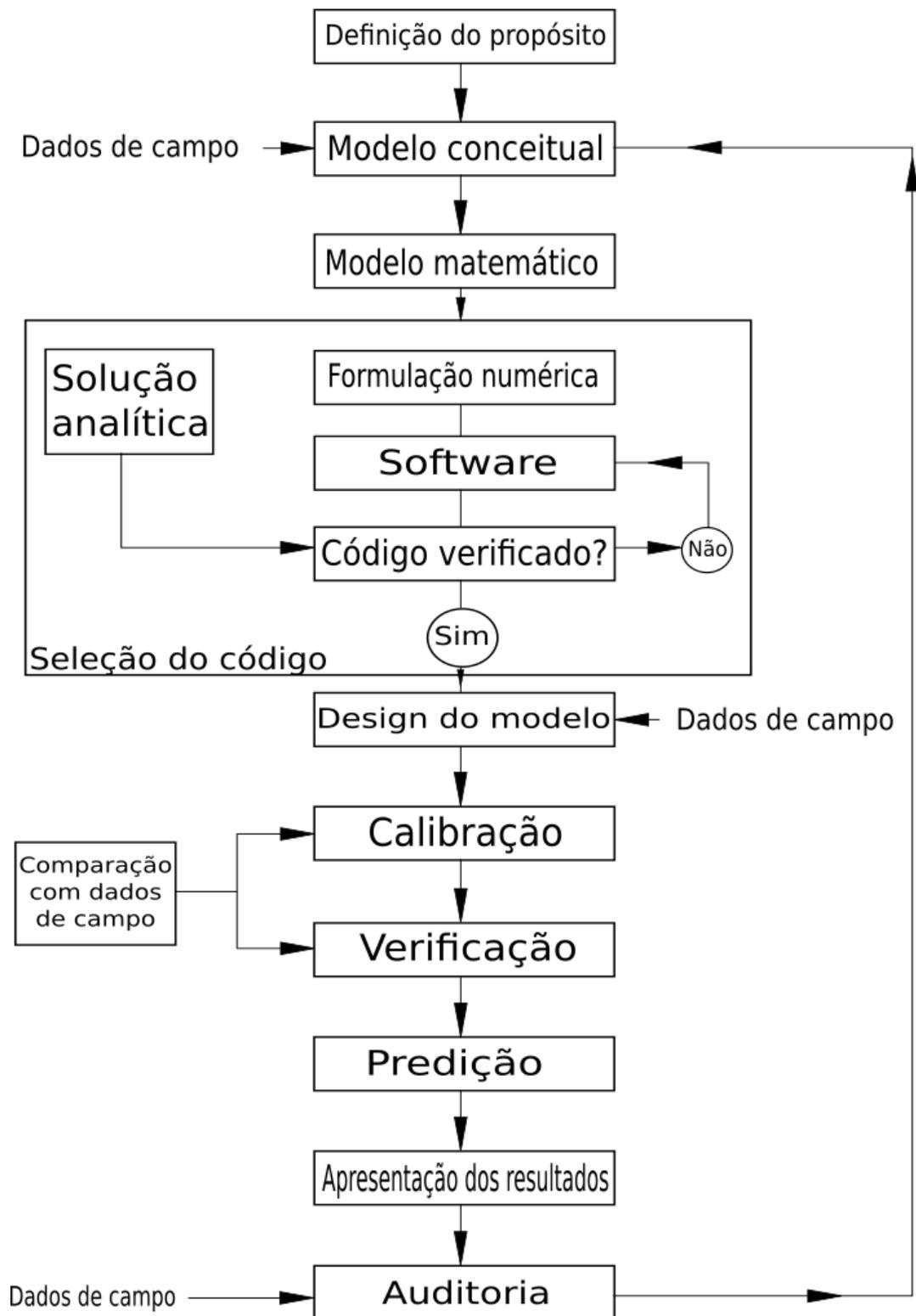


Figura 7: Protocolo para a elaboração de um modelo hidrogeológico (Anderson & Woessner, 2002. Tradução feita pelo autor).

### 5.1. Seleção de código e ambiente de modelamento

Para realizar o modelamento numérico do Aquífero Alter do Chão foi utilizado o Software Groundwater Vistas 6 (GwV) como ambiente de modelamento, já que permite a utilização de códigos diferentes em um mesmo projeto, possui recursos que permitem elaborar um modelo numérico mais fidedigno, além de uma interface intuitiva. O código selecionado para a simulação principal é o MODFLOW2000, pois se trata de um programa, robusto, amplamente utilizado e reconhecido na comunidade científica. A calibração e análise de incertezas serão realizadas através do PEST, escolhido por sua precisão (DOHERTY, 2015), proporcionada pela diversidade de recursos para avaliar os resultados obtidos. O outro software de calibração oferecido pelo GwV, o GV Calibration, é mais simples e, por isso, menos preciso.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Bases gráficas para o modelo

Para elaborar o design do modelo hidrogeológico foi necessário primeiramente obter o contorno da área urbana da cidade de Manaus em formato Golden Software Blanking (bln), utilizando o software Surfer 11 da empresa Golden Software, por ser de simples manipulação, entretanto, o GwV possui suporte de entrada para outros formatos. Para isso, foi utilizada uma base cartográfica fornecida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) no formato shapefile (.shp). Essa base foi inserida no Surfer 11, teve seu contorno sobrescrito e salvo no formato exigido pelo Groundwater Vistas. O software de modelamento reconhece apenas bases georreferenciadas em UTM e com datum WGS 84. O georrefenciamento do contorno foi realizado utilizando o ArcMap 10.3, através de uma imagem Landsat com pontos de coordenadas conhecidas e bem distribuídas no espaço.

Em seguida foi adicionada a malha hidrográfica da região de Manaus. A malha foi extraída do arquivo Shapefile elaborado pela CPRM e disponibilizado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) do projeto Geodiversidade do Amazonas. Foi necessária a criação de um arquivo novo, uma vez que o Shapefile fornecido é bifilar, sobrecarregando o programa de modelamento, além de apresentar drenagens flutuantes e microbacias que prejudicavam a discretização do modelo.

Para eliminar estes problemas, foi gerada uma base de drenagens unifiliar das bacias principais no software elaborada no ArcMap 10.3, através da criação de linhas únicas, de mesma orientação dos canais, no centro das drenagens (Figura 8). Após esse passo, foi realizado o georreferenciamento deste novo mapa, cujos pontos de amarração foram as desembocaduras das principais bacias de drenagem no Rio Negro, localizados na imagem Landsat.

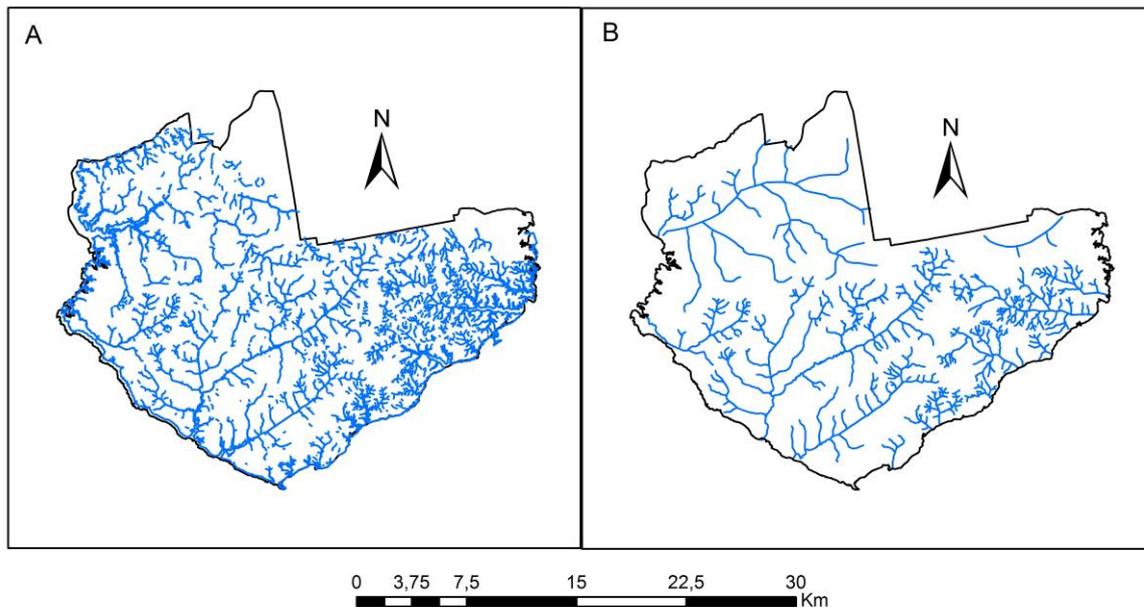


Figura 8: Comparação entre o arquivo com drenagens bifiliares (A) e o produto unifiliar gerado (B).

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado no desenho do modelo foi fornecido pela CPRM, em dois arquivos, um modelo com intervalo de cotas em 5 metros, abrangendo as zonas oeste, sul, centro e partes da zona norte e leste. O outro arquivo complementar às zonas norte e leste possui resolução de 20 metros. A junção e georreferenciamento dos dois arquivos foi realizado utilizando o ArcMap 10.3 (Figura 9). Para importar o arquivo no Groundwater Vistas, foi necessário transformar o arquivo para Surfer Grid (Binary v7 Format) (.grd), com o auxílio do software Global Mapper 12.02.

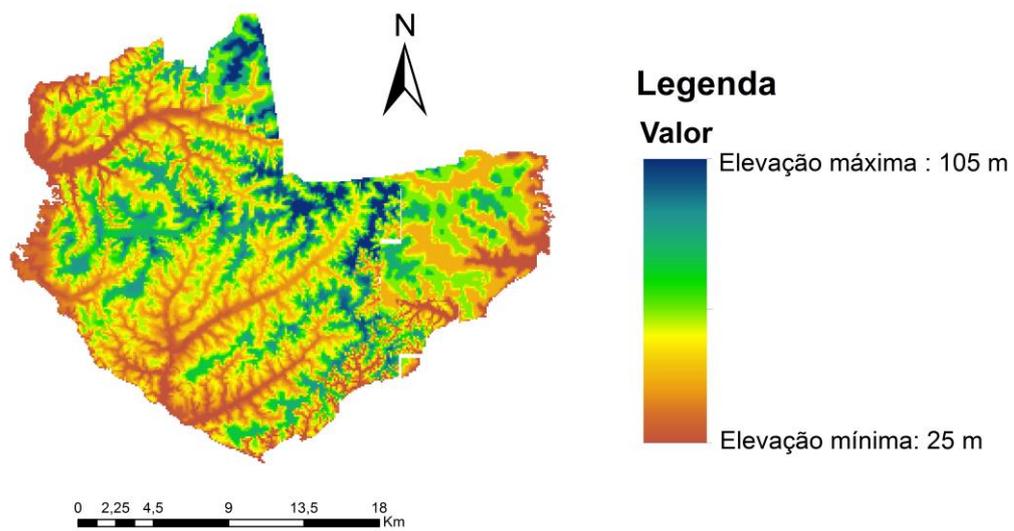


Figura 9: Modelo Digital de Elevação utilizado no modelamento.

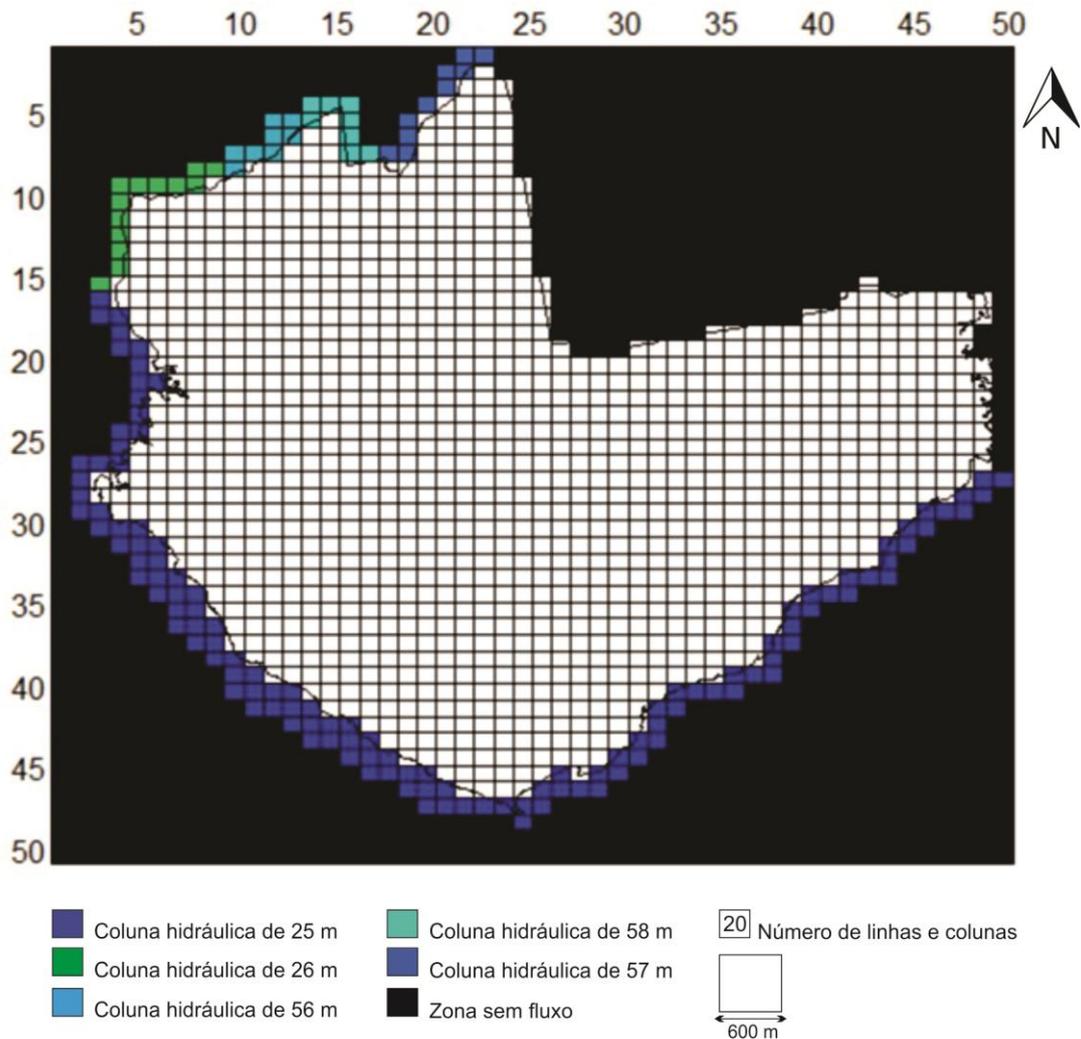
## 6.2. Elaboração do modelo

O primeiro passo para elaborar o modelo no software Groundwater Vistas foi inserir as bases cartográficas no programa, utilizando o recurso de importação, e fazer com que adapte à área a ser modelada ao formato da zona urbana de Manaus. Em seguida foi inserido o Modelo Digital de Elevação. A malha definida a princípio no GwV é composta por 50 colunas e 50 linhas de iguais dimensões (600 m x 600 m). Com os limites e elementos geográficos inseridos, as condições de contorno foram estabelecidas. No limite sul a condição de carga constante (no programa *–Head–* que é a altura da coluna hidrostática) é definida pela cota média anual do Rio Negro (26 metros) (Tabela 4). O limite oeste é definido pela cota média anual do Rio Tarumã (27 metros, com elevação de dois metros à montante, de acordo com o MDE fornecido pelo Google Earth). O limite leste foi definido da mesma forma, usando o contorno do Igarapé do Puraquequara, com elevação de 26 metros. A carga do limite norte foi calculada utilizando informações do banco de dados da CPRM, o SIAGAS, onde foram identificados poços vizinhos ao limite, com coordenadas geográficas definidas, e com datas de construção e profundidades próximas, para que o nível de água representasse a superfície potenciométrica em uma mesma época do ano, sem influência de variações sazonais de nível de água, e sem influência de variação da potenciométrica em função da profundidade. Era necessário também que os dados sobre nível estático e a cota topográfica da boca do poço estivessem presentes. A altura da coluna hidrostática é encontrada através da subtração da cota da boca do poço da profundidade do nível de água.

Tabela 4: Variação da cota do Rio Negro, em metros, durante uma década, medida no Porto de Manaus (PORTO DE MANAUS, 2017).

Ano	1º semestre						2º semestre						Média anual (m)
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2016	19,0	19,9	21,7	24,4	26,4	27,1	27,0	25,7	22,0	18,4	18,1	17,7	22,3
2015	22,5	24,3	25,8	27,5	28,8	29,6	29,4	28,2	25,7	18,7	16,6	17,2	24,5
2014	22,8	24,0	25,6	27,4	28,7	29,5	29,4	28,2	25,5	21,2	20,2	21,3	25,3
2013	20,8	23,4	26,0	27,4	28,6	29,3	28,6	26,9	24,6	20,9	19,8	21,6	24,8
2012	22,3	25,2	27,0	28,5	29,7	29,7	28,7	26,8	22,0	17,4	16,6	17,5	24,3
2011	19,5	21,8	24,0	25,8	27,6	28,5	28,2	26,3	20,9	17,2	17,6	19,2	23,0
2010	21,1	22,5	23,6	25,2	27,4	27,9	27,1	24,6	20,9	14,9	14,8	17,7	22,3
2009	23,5	25,6	26,8	28,2	29,0	29,5	29,5	28,0	24,7	19,2	17,2	17,6	24,9
2008	22,8	24,4	25,8	26,7	27,6	28,5	28,0	26,0	22,0	19,0	19,1	21,1	24,2
2007	22,4	23,5	23,6	25,2	27,1	28,1	27,8	26,1	21,8	18,3	18,6	20,5	23,6
2006	22,4	24,8	26,2	26,8	28,0	28,7	27,8	25,5	21,3	17,5	17,7	20,5	23,9
Média Década												26,3	

Como a malha gerada pelo programa é quadrática/retangular, foi necessário fazer um *grid* que extrapolasse a área urbana da cidade. Para não desperdiçar capacidade de processamento em áreas sem dados, uma zona sem fluxo foi inserida na área externa ao limite da área urbana de Manaus, preenchendo o excedente da malha (Figura 10).



**Figura 10:** Início do processo de desenho do modelo, com a delimitação das condições de contorno e adaptação da malha.

Os igarapés da cidade foram representados pela condição de contorno de córregos (*stream*) (Figura 11), cuja vantagem sobre a condição de rios (*river*) é que não representa um suprimento ilimitado de água, além de representar a diminuição da largura da drenagem à montante. Foram inseridos dados de largura e comprimento do canal, espessura do leito do canal, condutividade hidráulica do leito e elevação da superfície do igarapé.

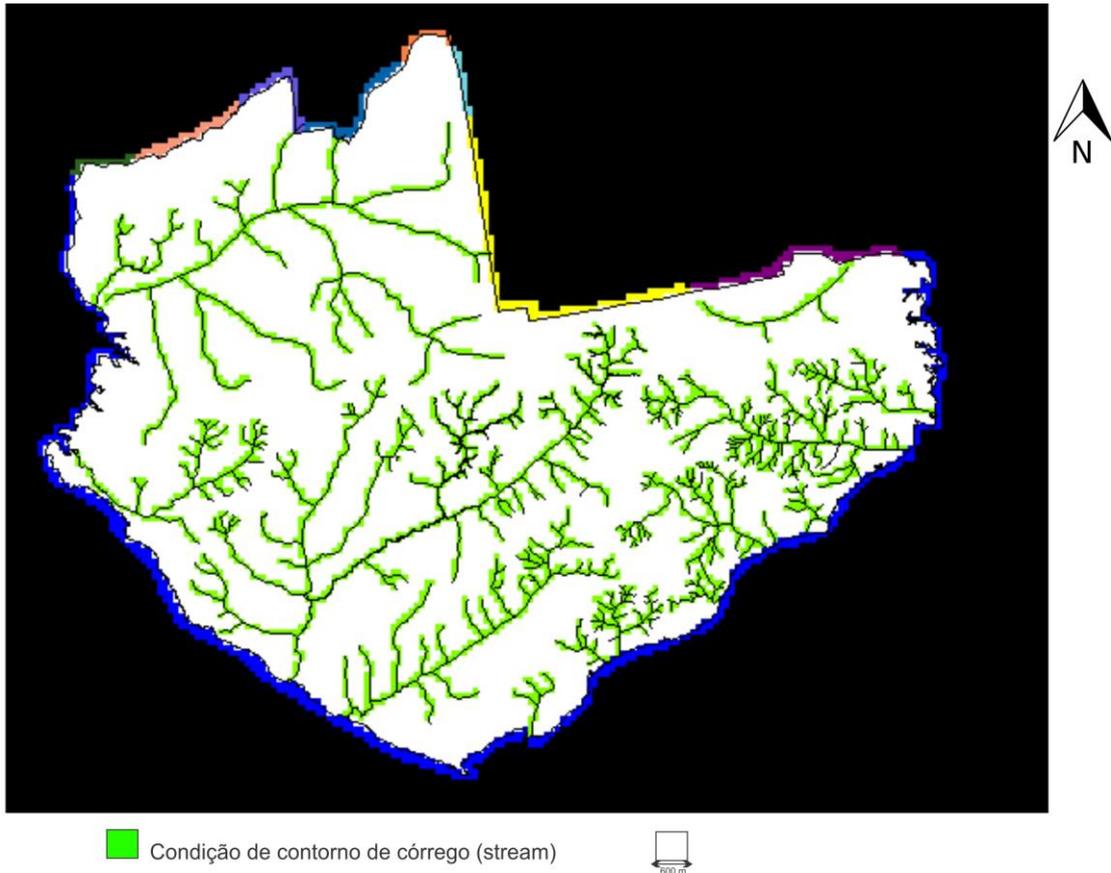


Figura 11: Condição de contorno utilizada para simular os igarapés da cidade de Manaus.

Verticalmente o modelo foi dividido em três camadas (Figura 12). A camada superficial é a Formação Novo Remanso (Tabela 5), na qual predominam arenitos (DINO et al., 2012; SOARES et al., 2016), além de terraços fluviais e paleossolos lateríticos. A camada intermediária representa as porções central e profunda da Formação Alter do Chão, onde ocorrem frequentes intercalações de argilitos e siltitos nos arenitos, em espessuras variáveis e descontínuas. Para que a representação dos argilitos fosse fiel ao panorama real foram utilizados os perfis elaborados na Carta Hidrogeológica de Manaus (BRASIL, 2002), Souza (2006) e Shaft Consultoria (2005). A terceira camada, mais profunda, representando a Formação Nova Olinda, onde foi estabelecida a condição de contorno sem fluxo (*no flow*), uma vez que não há indícios da continuidade do aquífero na camada com base na análise da geologia.

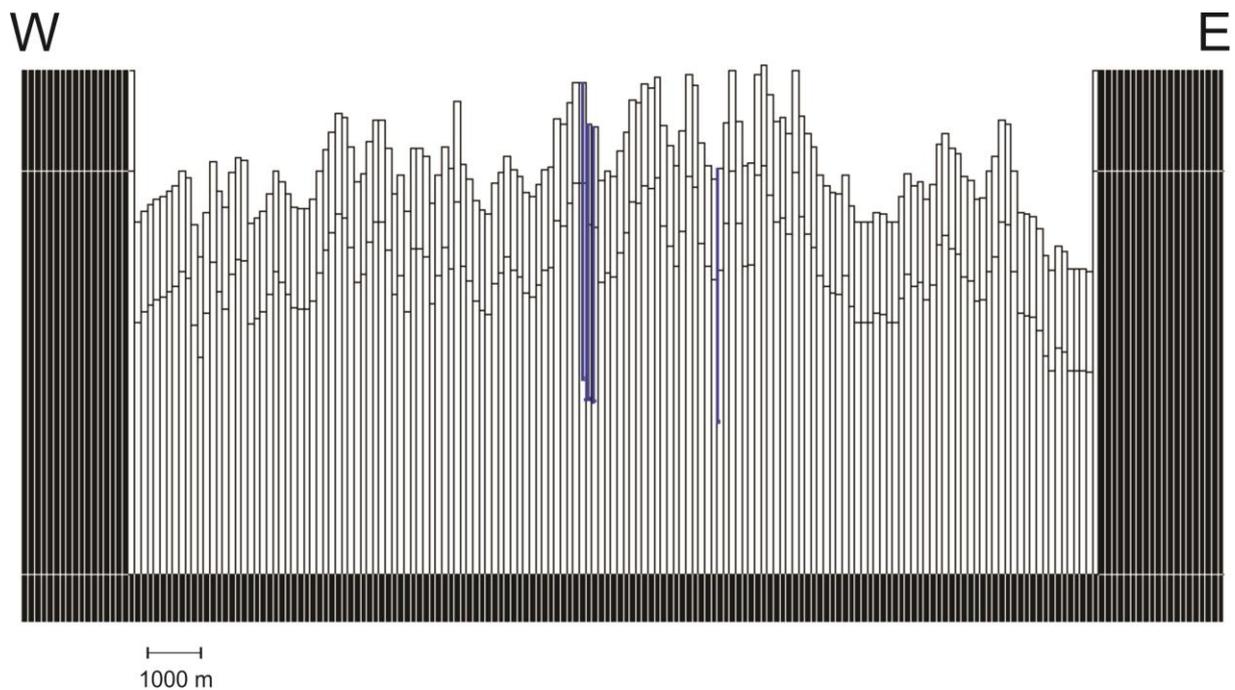
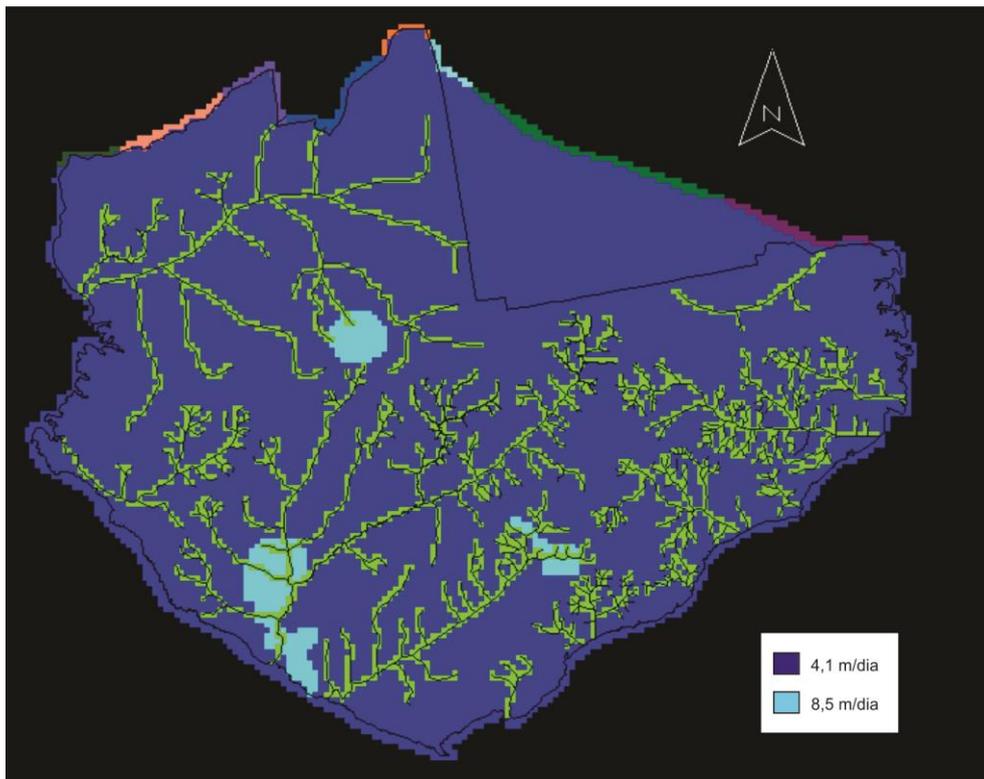


Figura 12: Seção cruzada em direção E-W do modelo numérico, representando a topografia. A cor preta são as zonas sem fluxo, limites externos do modelo.

Tabela 5: Relação entre camadas do modelo e sua equivalência estratigráfica

Formação	Condições de contorno	Presença de poços	Camada
Novo Remanso	Carga Constante	Não	1
Alter do Chão	Carga Constante	Sim	2
Nova Olinda	Sem fluxo	Não	3

Os dados de condutividade hidráulica foram calculados a partir da transmissividade disponibilizada na Carta Hidrogeológica de Manaus (BRASIL, 2002). Tais dados foram transformados em mapa por Miranda (2017) e inseridos no modelo (figura 12) como uma média dos valores obtidos para a área urbana da cidade de Manaus.



**Figura 13: Distribuição espacial dos dados de condutividade hidráulica inseridos no modelo.**

Os valores de recarga foram adicionados de acordo com o levantamento feito por Miranda (2017) (figura 13), que considerou para áreas de cobertura vegetal preservada os valores calculados por Brito (2014), de 963 mm para a infiltração de água no solo, representando 41% de 2.349, que é a taxa média de precipitação para a cidade de Manaus. Para a área urbanizada, Miranda (2017) identificou quatro fontes principais para a recarga:

- Recarga natural por infiltração de água de chuva;
- Recarga por infiltração oriunda de vazamentos na rede de distribuição pública de água;
- Recarga por infiltração de esgoto lançado em fossas (sépticas e irregulares);
- Recarga por lançamento de esgoto a céu aberto.

Miranda (2017) utilizou os dados fornecidos no relatório anual da ARSAM (2012) e SNIS (2014) para estimar a taxa média de recarga indireta, chegando a um volume de 75,73 m<sup>3</sup>/dia/km em perdas lineares provenientes de vazamento da tubulação, valor que equivale a 48,6% da água tratada na cidade. Enquanto 9,66x10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/ano, equivalente a 51,4% do volume restante torna-se efluente.

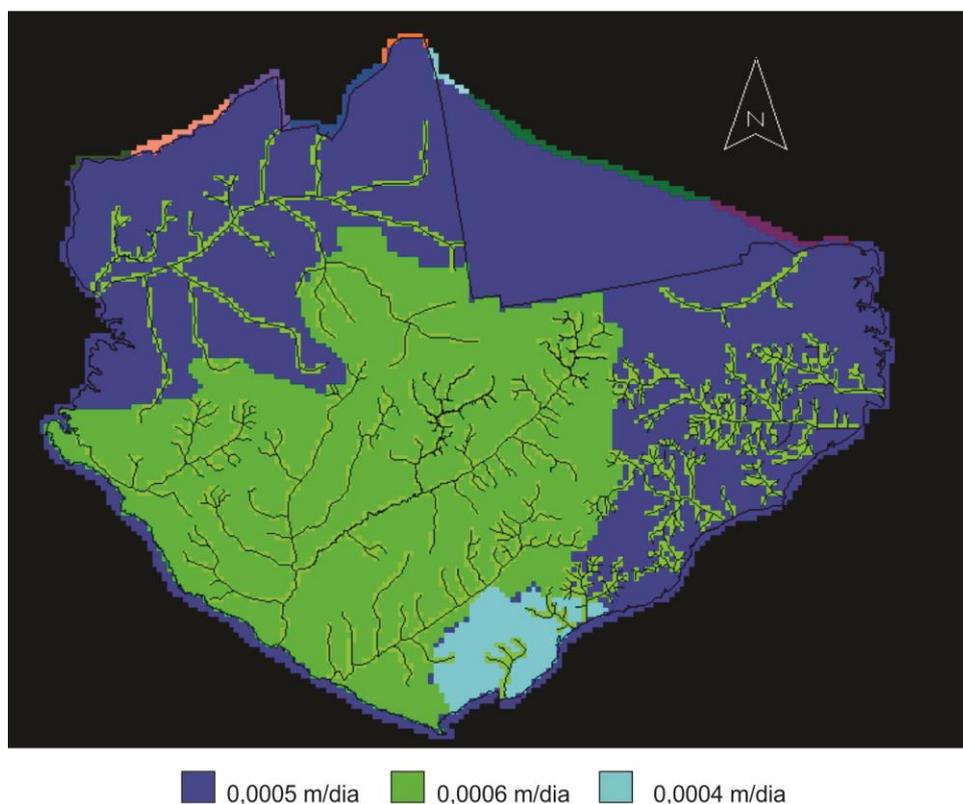


Figura 14: Distribuição dos valores e zonas de recarga inseridos no modelo.

Para a adição dos poços ao modelo, foram usadas as informações disponibilizadas pelo banco de dados SIAGAS. Foram selecionados poços com dados de profundidade total e dos filtros, vazão e coordenadas geográficas definidas. Estes dados foram inseridos em uma tabela do Excel, para posteriormente ser importada no programa ArcMap na forma de pontos. Foi então feito o georreferenciamento e a importação como um arquivo shapefile no GwV.

### 6.3. Calibração do modelo

A calibração do modelo é um dos processos mais complexos no processo de aplicação do modelo hidrogeológico. O GwV permite realizar a calibração de três maneiras distintas: (1) Cálculo de calibração estatística para coluna hidrostática, rebaixamento, concentração ou fluxo; (2) Análise automatizada de sensibilidade por parâmetro; (3) Modelo automático de calibração usando uma técnica não linear de quadrados mínimos, usando o PEST e o MODFLOW2000.

Para o início do processo de calibração é necessário adicionar alvos de calibração (*targets*). Um alvo de calibração é um ponto no aquífero onde a coluna hidrostática, rebaixamento, fluxo ou concentração de solutos foi medido. Quando o modelo é rodado para a calibração, o programa lê os resultados obtidos e compara com o alvo, tanto no espaço, quanto no tempo, para encontrar erros ou imprecisões. A análise de imprecisão é fundamental para a determinação da qualidade da modelagem, colaborando com seu refinamento. O refinamento é realizado através da correção do desvio padrão gerado pelo código de calibração para cada alvo de calibração.

Os alvos para calibração foram selecionados usando os dados da coluna hidrostática dos poços disponíveis na Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas - RIMAS (BRASIL, 2009), rede esta que possui uma série histórica de dados do nível de água, bem como os dados construtivos dos poços. Foram utilizados os dados atuais e da série histórica da última década, do nível de água nos cinco poços com estas informações disponíveis em Manaus. As estatísticas obtidas dos alvos foram:

A média residual é a distância vertical entre um dado ponto e a linha de regressão (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

O desvio padrão residual exprime a dispersão dos valores do sinal instrumental em torno de uma curva de calibração (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

A soma dos quadrados residual é a variação atribuída ao erro (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

A média residual absoluta é a média do erro absoluto para as observações. É a média verdadeira, não deixando erros positivos ou negativos cancelarem (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

O mínimo residual (MINRES) é um método iterativo para solução numérica de sistemas de equações lineares não simétricas. O método aproxima a solução pelo vetor em um subespaço de Krylov (espaço gerado por uma matriz quadrática e um vetor de dimensão determinada) com o mínimo residual (RITCHEY E RUMBAUGH, 1996).

O máximo residual é proposto como uma medida heurística da precisão do modelo na predição das colunas hidrostáticas (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

A variação observada na coluna hidráulica é a diferença observada entre os dados do modelo e dos alvos indicados, durante o processo de calibração do modelo (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

A variação no desvio padrão residual é o termo que descreve o desvio padrão dos pontos formados ao redor de uma função linear, e é uma estimativa da acurácia da variável dependente que está sendo medida (RITCHEY; RUMBAUGH, 1996).

**Tabela 6: Dados estatísticos pós-processo de calibração do modelo.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Média residual</b>	-0,57
<b>Desvio padrão residual</b>	0,74
<b>Soma dos quadrados residual</b>	$1,3 \times 10^{-001}$
<b>Média residual absoluta</b>	0,69
<b>Mínimo residual</b>	-1,43
<b>Máximo residual</b>	0,81
<b>Varição observada na coluna hidr.</b>	14,32 metros
<b>Varição no desvio padrão residual</b>	0,088

#### 6.4. Predição de cenários climáticos futuros

Os cenários foram elaborados com base nos dados disponibilizados pelo Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC), uma organização ligada à Organização das Nações Unidas (ONU), com iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e Organização Meteorológica Mundial (OMM) com o intuito de fornecer informações a todos os níveis de governo, como uma forma de auxílio no desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao meio-ambiente, bem como embasar as negociações na Conferência de Mudanças Climáticas da ONU.

Para elaborar as predições, foram utilizados os dados e intervalos de tempo disponíveis no Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental em

Mudanças Climáticas (Fifth Assessment Report – AR5), que é o mais recente, tendo sido iniciado na 28ª sessão dos membros do IPCC, em 09 de abril de 2008, na cidade de Budapest, Hungria, e finalizado em novembro de 2014 (IPCC, 2014). Trata-se de um documento elaborado em cooperação técnica mundial entre centenas de cientistas (IPCC, 2014).

Na execução do modelamento e pesquisa, os cientistas do IPCC utilizam Caminhos Representativos de Concentração (*Representative Concentration Pathways*), ou RCP, que são quatro trajetórias de concentração de gases do efeito estufa, descrevendo quatro cenários de possibilidades climáticas dependentes da quantidade de gases do efeito estufa a serem emitidos nos anos vindouros. Os quatro RCPs (RCP 2,6; RCP 4,5; RCP 6; RCP 8.5) são nomeados de acordo com a possibilidade de forçante radioativa em 2100 em relação a dados da época pré-industrial, sendo +2,6; +4,5; +6 e +8,5 W/m<sup>2</sup> (IPCC, 2014). As projeções incluem aumento da temperatura global (Tabela 7) e elevação do nível do mar (Tabela 8), que implica diretamente na alteração do regime hídrico em diversas regiões do mundo.

Tabela 7: Projeção de elevação da temperatura global, em °C (IPCC, 2014).

Cenário	2046 – 2065		2081 – 2100	
	Principal	(margem de erro)	Principal	(margem de erro)
RCP 2,6	1,0	(0,4 a 1,6) °C	1,0	(0,3 a 1,7) °C
RCP 4,5	1,4	(0,9 a 2,0) °C	1,8	(1,1 a 2,6) °C
RCP 6	1,3	(0,8 a 1,8) °C	2,2	(1,4 a 3,1) °C
RCP 8,5	2,0	(1,4 a 2,6) °C	3,7	(2,6 a 4,8) °C

Tabela 8: Projeção de elevação do nível do mar, em metros (IPCC, 2014).

Cenário	2046 – 2065		2081 – 2100	
	Principal	(margem de erro)	Principal	(margem de erro)
RCP 2,6	0,24	(0,17 a 0,32) °C	0,40	(0,26 a 0,55) °C
RCP 4,5	0,26	(0,19 a 0,33) °C	0,47	(0,32 a 0,63) °C

RCP 6	0,25 (0,18 a 0,32) °C	0,48 (0,33 a 0,63) °C
RCP 8,5	0,30 (0,22 a 0,38) °C	0,63 (0,45 a 0,82) °C

No modelo hidrogeológico de Manaus foram utilizadas as projeções de alteração na precipitação da região amazônica (Tabela 9) para os anos de 2035, 2065 e 2100. Os Caminhos Representativos de Concentração utilizados foram os RCP 4,5 e RCP 8,5, que, segundo o AR5 (IPCC, 2014) são os cenários com grau de confiabilidade maior, uma vez que possuem mais modelos replicados.

Tabela 9: Projeção de variação na precipitação para a região Amazônica até o ano de 2100, tendo como base o intervalo entre os anos 1901 -2013. (IPCC, 2014)

Cenário	Ano	Variação na precipitação %
RCP 4,5	2035	-7
	2065	-10
	2100	-15
RCP 8,5	2035	-12
	2065	-23
	2100	-33

Os cenários para os anos de 2020 e 2025 baseiam-se em projeções de melhora da economia e crescimento da atividade industrial (BRASIL, 2017) (figura 14), juntamente com as políticas de manutenção e investimentos do Polo Industrial de Manaus. Esses fatores implicam em atração de novas indústrias, sabe-se que a maioria das empresas instaladas no PIM utilizam da água subterrânea, então provavelmente as novas indústrias que se instalarem assim o farão também. A instalação das novas fábricas e a disponibilidade de emprego pode trazer novos moradores à cidade, que por sua vez, em parte utilizam do recurso subterrâneo para abastecimento residencial. O cenário de menor aumento até 2020 inclui um incremento de 5% na exploração das águas subterrâneas, enquanto no cenário de maior aumento este valor sobe para 15%. Levando em consideração que há uma média de crescimento populacional em Manaus de 33% a cada década (BRASIL,

2014), tendo como base a média da família brasileira com quatro indivíduos, até 2020 serão aproximadamente 82.500 famílias, levando em conta uma média de quatro pessoas em cada família. Considerando o consumo familiar médio de 0,6 m<sup>3</sup>/dia, valor obtido através da análise da conta de água de famílias manauaras, o aumento populacional gerará um acréscimo de 56.666 m<sup>3</sup>/dia no consumo de água. De acordo com os dados do SIAGAS (BRASIL, 2009), 254.564 m<sup>3</sup>/dia são explotados do Aquífero Alter do Chão na zona urbana de Manaus, portanto o impacto dessas novas famílias equivale a 22,26% no consumo atual. Seguindo o mesmo raciocínio, para 2025 é considerado um aumento da exploração de 10% no cenário otimista e 30% no pessimista.

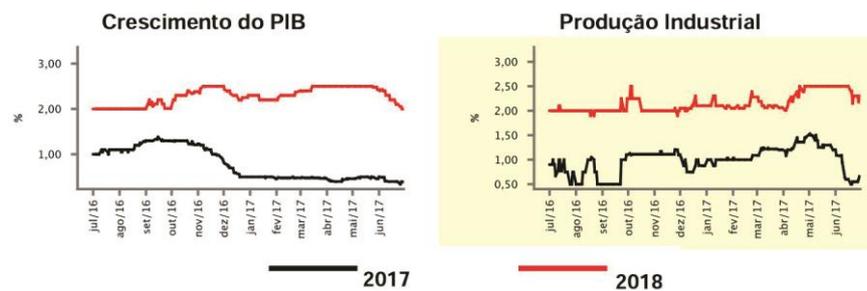


Figura 15: Projeção do panorama econômico para o ano de 2018 e comparação com o ano de 2017, mostrando a tendência de crescimento da economia (Crescimento do PIB) e aumento da produção industrial (BRASIL, 2017).

Os cenários otimistas em termos de pressão de consumo de água do Aquífero Alter do Chão, para 2020 e 2025, levam em consideração a diminuição do fluxo migratório, a continuidade dos programas de expansão da rede de saneamento básico, desligamento dos poços de abastecimento público com grande vazão e a expansão dos pontos de captação de águas superficiais. Os cenários pessimistas consideram um aumento no fluxo migratório, a instalação de indústrias com poços de grande vazão, o abandono de políticas públicas de expansão da rede de saneamento básico e diretrizes para o uso racional do aquífero.

Os dados obtidos no decorrer do projeto possibilitaram a elaboração de onze cenários e seus respectivos modelos. Um deles, de referência, é o do quadro atual da exploração do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus, e os outros dez são de cenários futuros para diferentes condicionantes socioeconômicas (quatro projeções) e ambientais (seis projeções). Os resultados obtidos são apresentados a seguir na forma de mapas, onde as cores variam do azul, para regiões onde a coluna hidrostática se apresenta em maior espessura, e vermelho para localidades em que a espessura é menor. As células secas são representadas pela coloração vermelho haute e indicam uma zona no aquífero onde até a determinada profundidade os poros das rochas são preenchidos com ar e não com água.

#### 6.5. Cenário 1: 2017 – Quadro atual

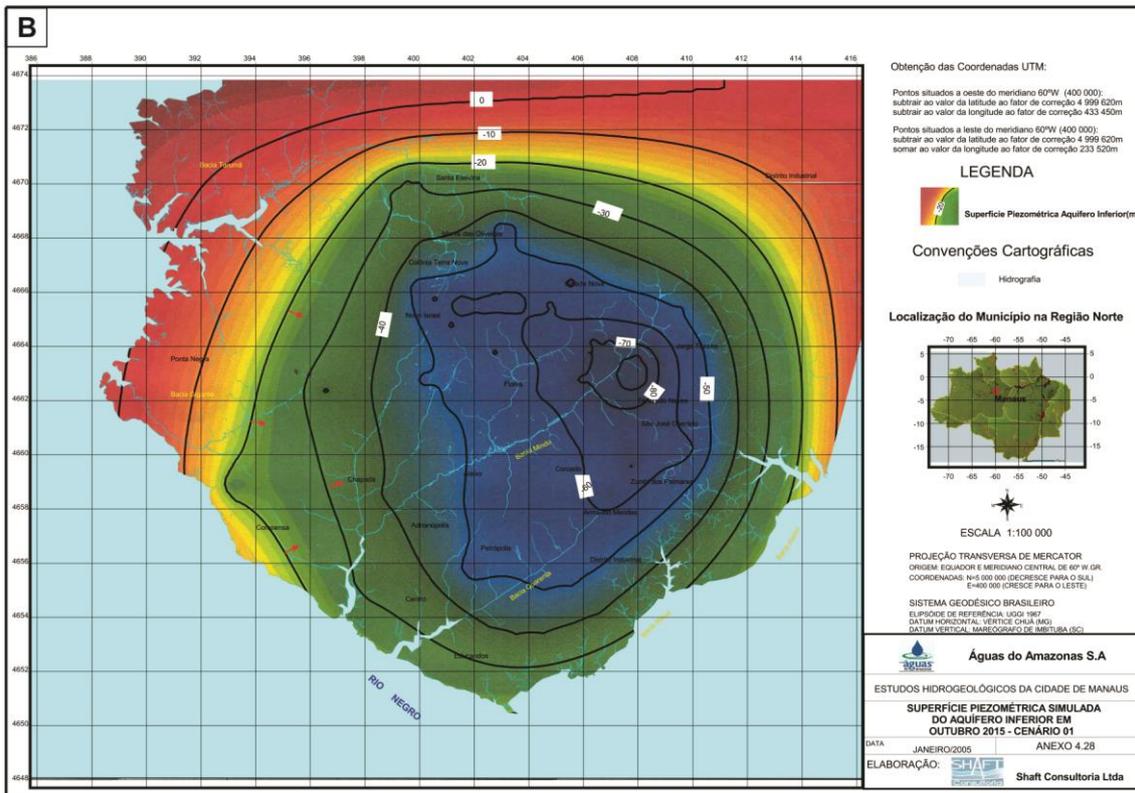
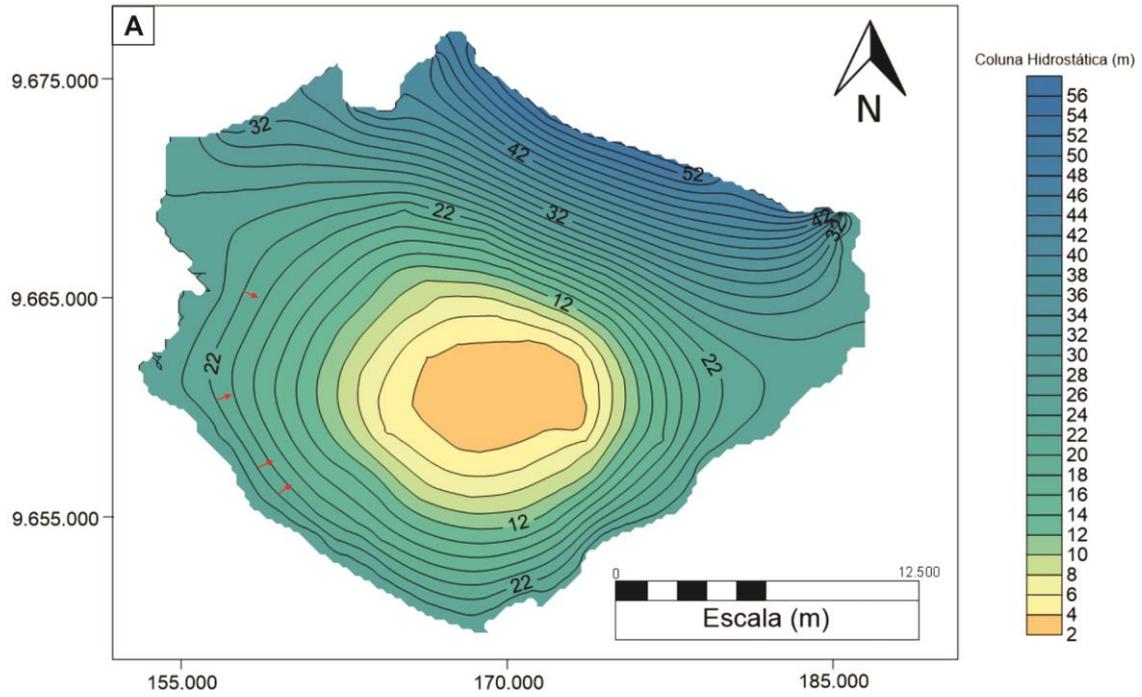
O cenário simulado para a situação atual do aquífero na área urbana de Manaus mostra um rebaixamento intenso na zona leste e central da cidade (Figura 15A), ocasionado principalmente pela alta densidade populacional, população essa que se serve da água subterrânea para o suprimento familiar. Nas zonas norte e leste há concentração de poços de grande vazão da concessionária responsável pelo abastecimento público, 165 ao todo, e de poços de empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM). Os poços dessas empresas possuem vazões entre 1,3 m<sup>3</sup>/h e 84 m<sup>3</sup>/h (BRASIL, 2009), contribuindo para a redução do nível potenciométrico na região.

Outro ponto a se notar é a inversão de fluxo na região sudoeste. De acordo com a Carta Hidrogeológica de Manaus, a direção do fluxo regional é de nordeste para sudoeste, mas de acordo com o modelo realizado neste trabalho, sob os bairros das zonas oeste, sul e centro-sul, há a entrada de água proveniente do Rio Negro, em um fluxo direcionado para a região onde a coluna hidrostática é a mais baixa.

Esta simulação permitiu a comparação (Figura 16 B) com o modelo feito pela Shaft Consultoria (SHAFT, 2005), que reproduziram um cenário de aumento progressivo na utilização do Aquífero até o ano de 2015. Ambos os resultados mostram a inversão de fluxo na zona sudoeste da cidade. Os resultados mostram-se semelhantes também na localização e extensão da área onde o nível potenciométrico é menor. As pequenas diferenças podem ter ocorrido devido à utilização de diferentes condições de contorno para a execução do projeto, onde a

Shaft (2005) empregou o nível piezométrico, que é o nível que a água de um aquífero se encontra à pressão atmosférica, enquanto o presente trabalho usou coluna hidrostática para a simulação, que, segundo Fitts (2012) é o parâmetro mais conveniente para a análise de fluxo.

### Cenário 2017

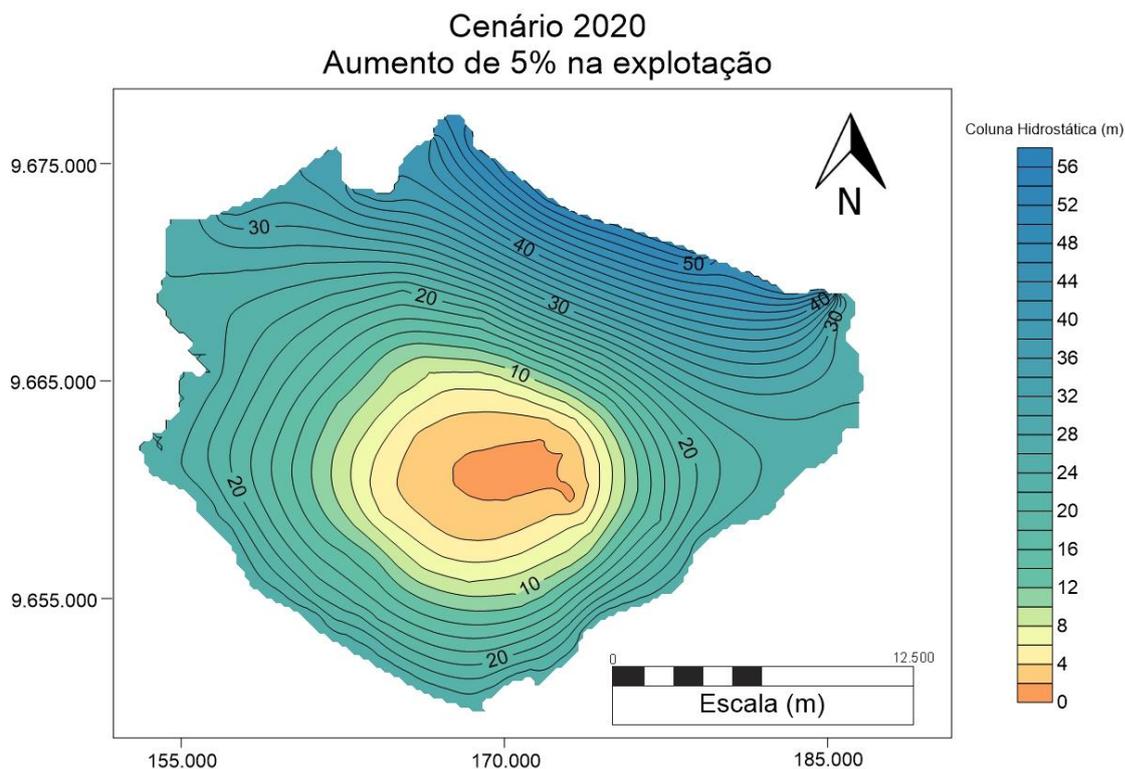


→ Direção de fluxo

Figura 16: A) Cenário simulado para o ano de 2017 mostrando o rebaixamento acentuado na região centro-leste e a reversão de fluxo na zona oeste. B) Modelo elaborado pela Shaft (2005), para o ano de 2015.

## 6.6. Cenário 2 – Projeções para o ano de 2020.

Usando como referência o quadro positivo, que considera leve aumento de 5% no total de água extraída do Aquífero Alter do Chão, nota-se a diminuição da área onde o rebaixamento é mais crítico comparado ao cenário de 2017 (Figura 16), entretanto é perceptível a progressão da redução da coluna hidrostática em uma região ampla, se estendendo para todas as zonas da cidade. Quando é considerado o incremento de 15% na exploração (Figura 17), de acordo com a projeção pessimista, há o surgimento de células secas sob a zona leste, que são regiões onde o rebaixamento é tão acentuado que um dado intervalo no aquífero não apresenta mais a zona saturada como outrora. Nos primeiros 60 metros de profundidade o rebaixamento do nível de água é mais amplo e agudo, chegando a uma variação de até dois metros de diferença em uma mesma localidade. Nestes locais os poços rasos, de até 60 metros ficariam secos.



**Figura 17: Figura 15: Projeção para o ano de 2020, em um cenário de crescimento econômico e implementação de medidas para o uso racional do aquífero.**

Cenário 2020  
Aumento de 15% na exploração

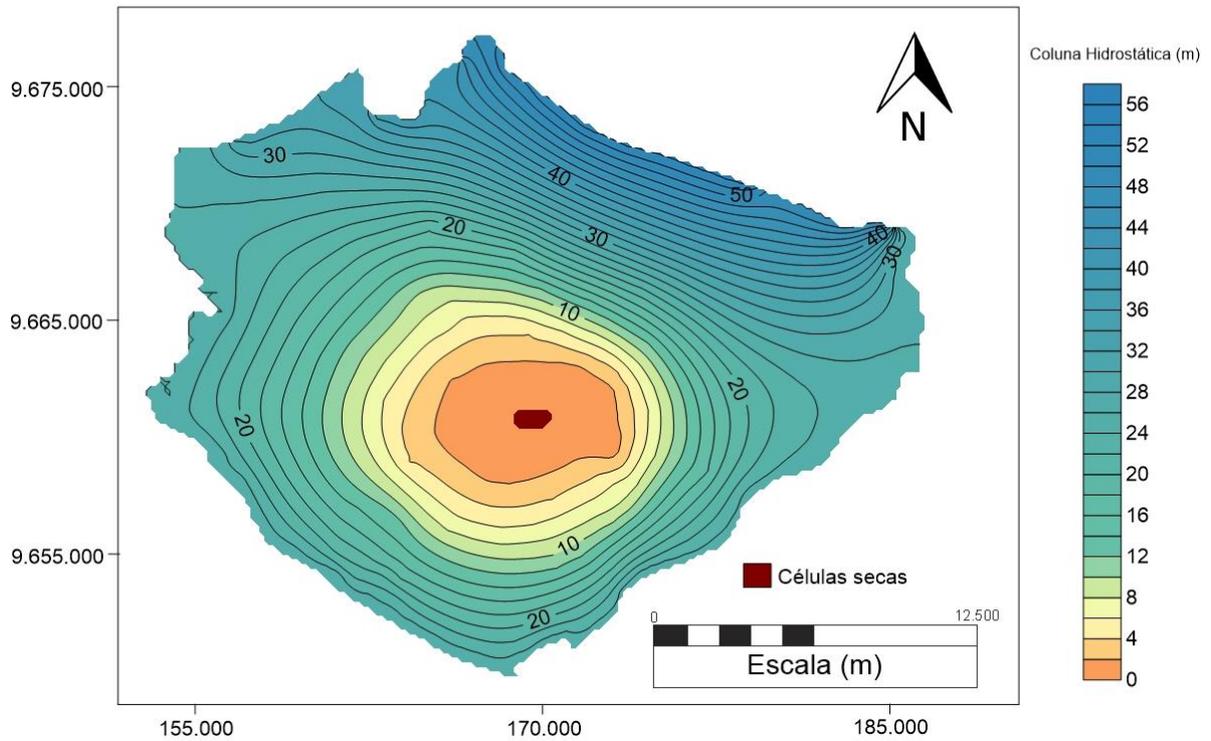


Figura 18: Projeção pessimista para o ano de 2020, com o aumento de 15% na exploração  
Exploração

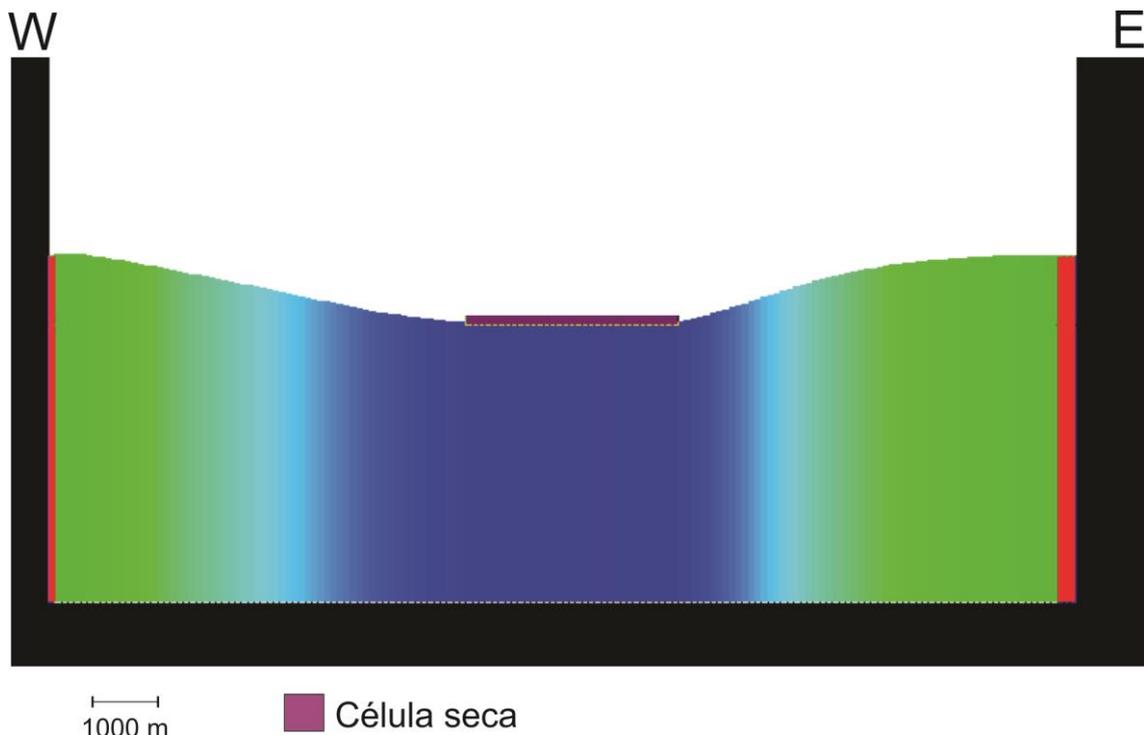


Figura 19: Presença de células secas na porção superior central do perfil no modelo numérico, em roxo. As demais colorações indicam diferentes níveis de coluna hidrostática.

#### 6.7. Cenário 3 – Projeções para o ano de 2025

Utilizando o cenário positivo para o ano de 2025, que prevê um aumento de 10% na exploração (Figura 18), é possível notar o rebaixamento de grande extensão pelas zonas norte, leste e central. Há ainda uma área com maior rebaixamento sob os bairros do Novo Aleixo e São José. Analisando a projeção pessimista, que considera um aumento de 30% no uso do recurso hídrico subterrâneo (Figura 19), destaca-se a formação de células secas em uma grande extensão da cidade, para profundidades de até sessenta metros. Abaixo dessa profundidade o cenário se assemelha ao encontrado na projeção positiva para o mesmo período. O rebaixamento acentuado em área tão extensa como as previstas por este modelo pode desencadear conflitos por água para os pequenos usuários, onde seus poços com profundidades de até sessenta metros tornar-se-iam incapazes de produzir a quantidade de água requerida para o sustento de uma residência, levando à utilização de serviço de abastecimento público, que possui um custo mais elevado. Outro fator de impacto é o aumento nos custos da extração de água em poços com profundidade entre setenta e cem metros, que terão uma coluna de água menor e mais profunda, aumentando assim a Altura Manométrica Total (AMT), exigindo um maior esforço da bomba submersa para fornecer a mesma quantidade de água.

Cenário 2025  
Aumento de 10% na exploração

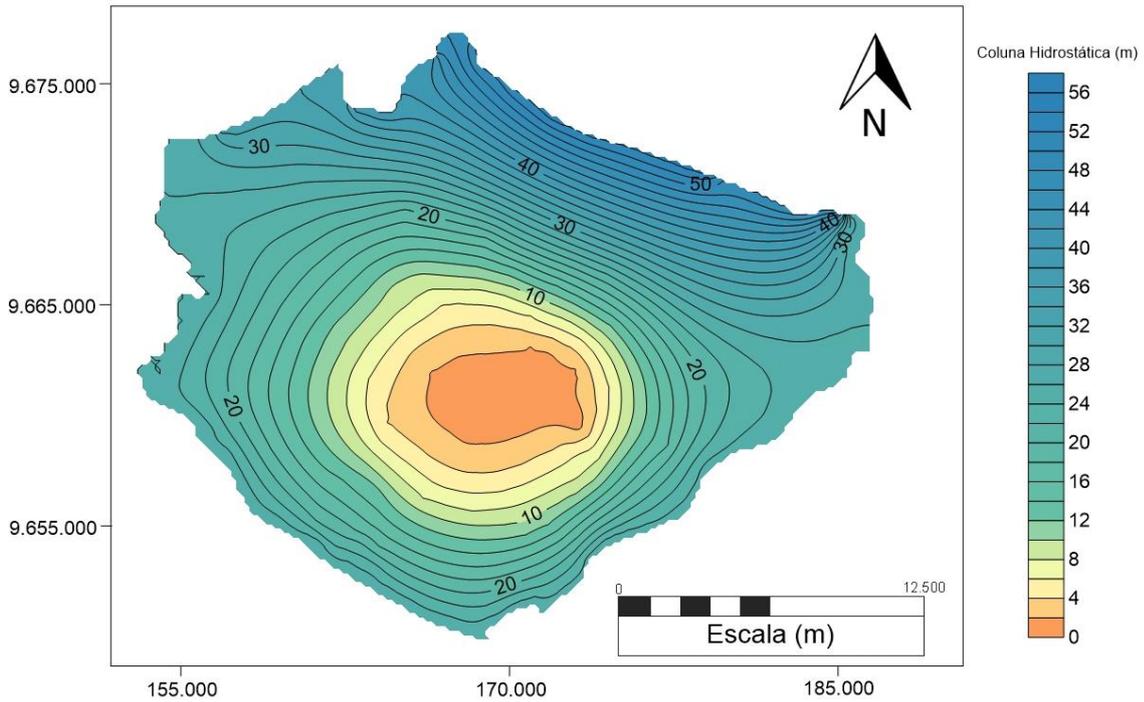


Figura 20: Cenário para o ano de 2025 em projeção otimista, que prevê a diminuição do crescimento da população e a continuidade de investimentos em políticas públicas de saneamento básico.

Cenário 2025  
Aumento de 30% na exploração  
Porção inferior

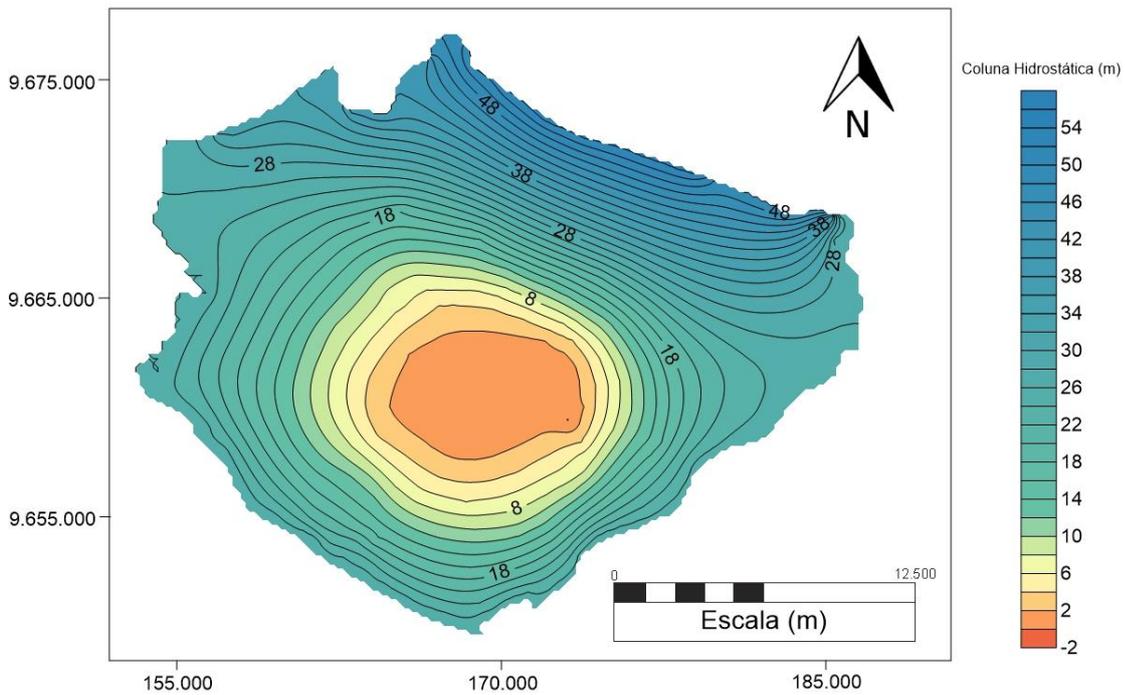


Figura 21: Projeção feita para o ano de 2025 em um cenário de aumento de 30% na exploração, para profundidades de até 60 metros.

### 6.8. Cenário 4 – Projeção para o ano de 2035 a partir dos cenários RCP 4.5 e 8.5 do IPCC

O primeiro modelamento utilizando os dados do IPCC mostra um progressivo rebaixamento do nível de água do Aquífero Alter do Chão comparado às projeções para 2025. Neste cenário, a redução da coluna hidrostática é mais acentuada com os dados do RCP 4.5, evidenciado pela região de menor valor na Figura 20 B, em face aos resultados obtidos na Figura 20 D. Enquanto os dados gerados pelo RCP 8.5 mostram um rebaixamento mais amplo, principalmente para as zonas norte e leste da cidade.

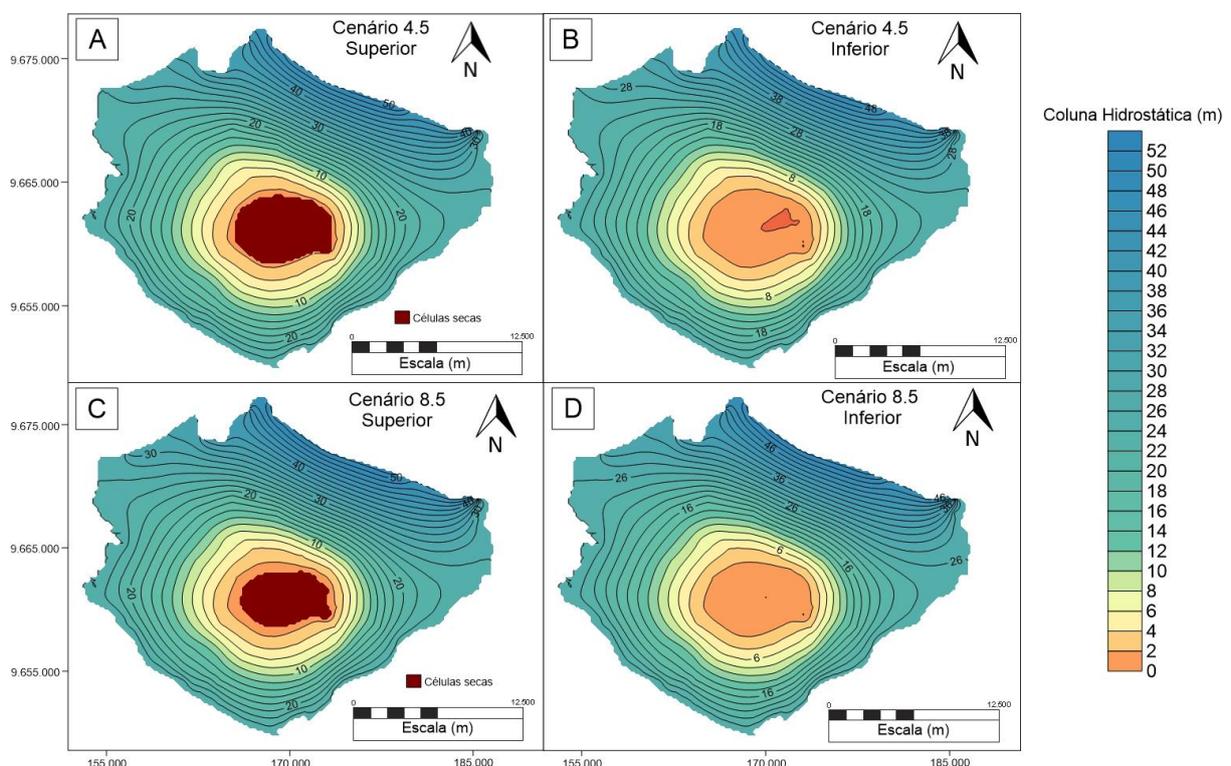
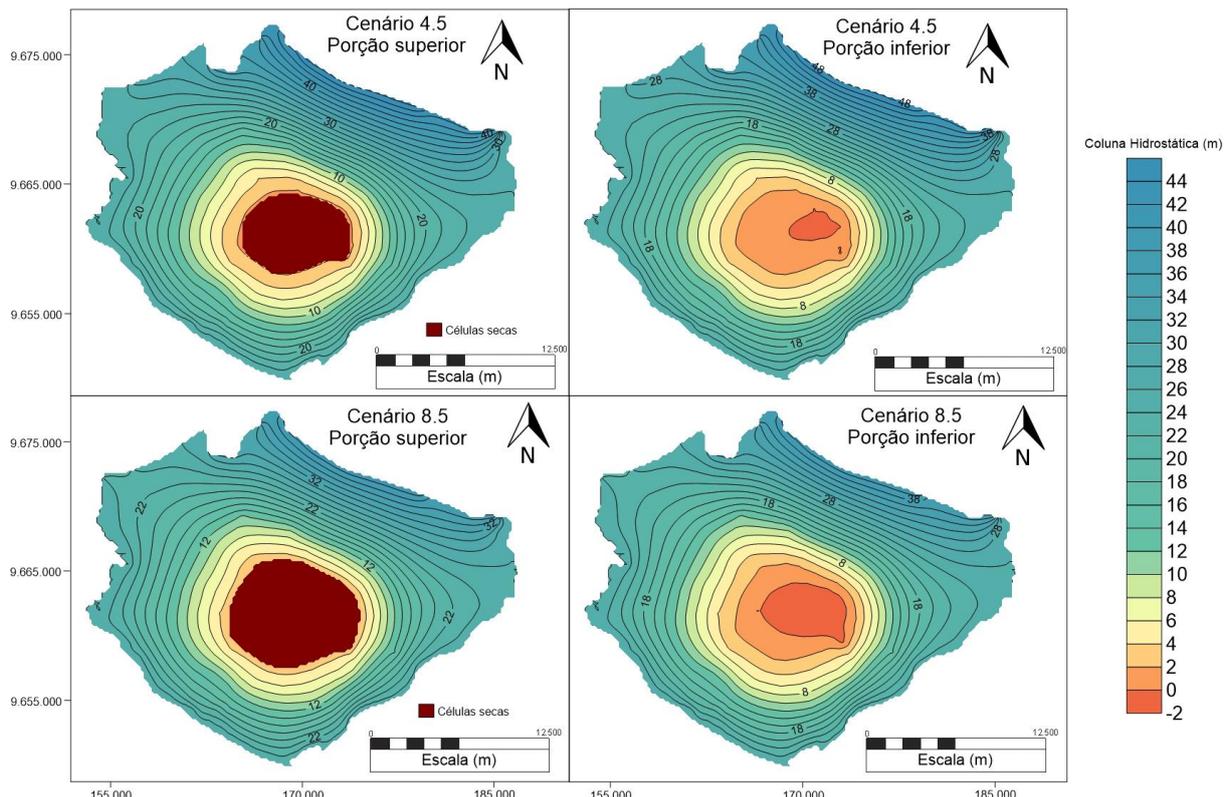


Figura 22: Projeção para o ano de 2035. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5.

### 6.9. Cenário 5 – Projeção para o ano de 2065 a partir dos cenários RCP 4.5 e 8.5 do IPCC

As simulações feitas para o ano de 2065 mostram um aumento progressivo no rebaixamento em relação à simulação de 2035. Nesta projeção é perceptível a ampliação da área rebaixada no cenário 8.5 (Figura 21 C e D), ultrapassando em tamanho a área do cenário 4.5 (Figura 21 A e B). Isso se deve ao regime severo de redução na precipitação estimada pelo RCP 8.5. Na porção inferior do cenário 8.5

(Figura 21 D) ocorre uma área com curvas potenciométricas de cotas abaixo do nível do mar, se expandindo para leste, ocasionada principalmente por ser nessa região que estão localizados os poços do sistema de abastecimento público, e grande parte dos poços residenciais e industriais, já que os bairros mais populosos e o Distrito Industrial ficam na zona leste da cidade.

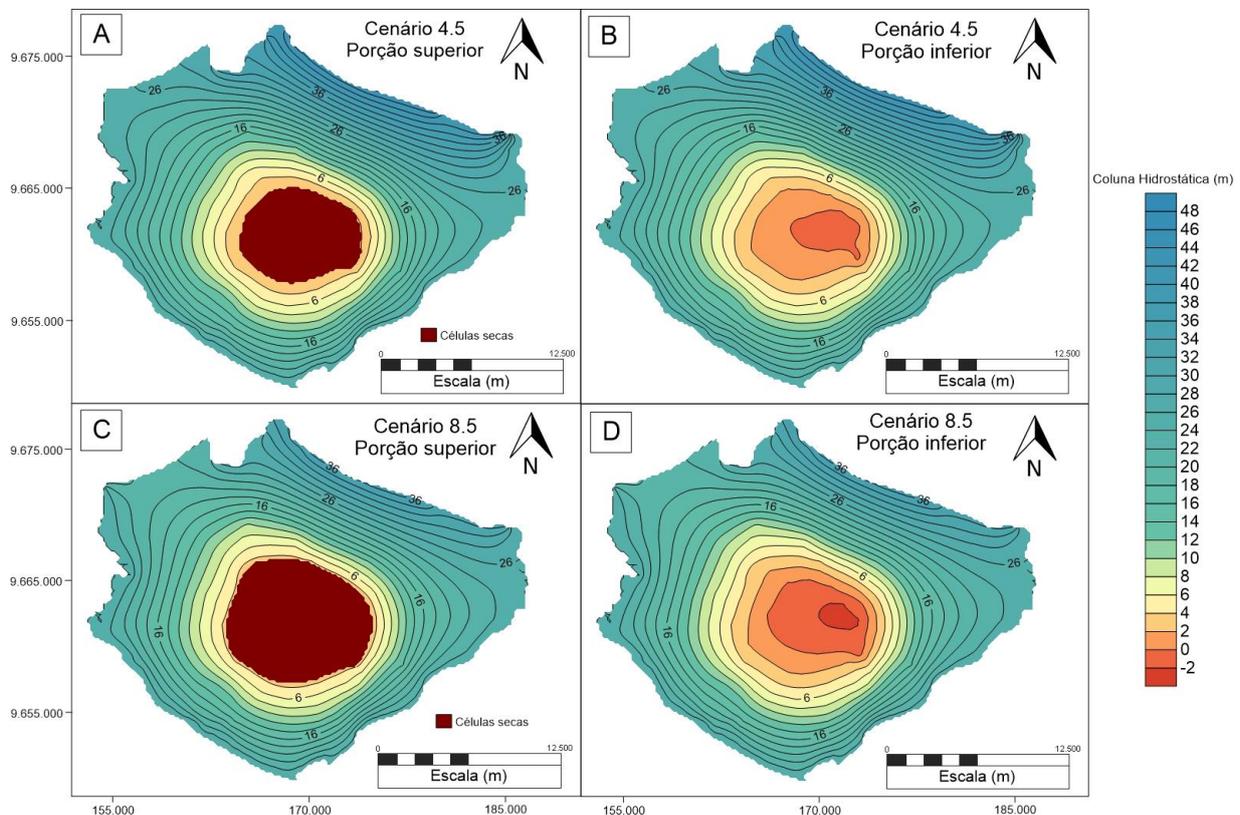


**Figura 23:** Projeção para o ano de 2065. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5.

#### 6.10. Cenário 6 – Projeção para o ano de 2100 a partir dos cenários RCP 4.5 e 8.5 do IPCC

A porção superior do aquífero Alter do Chão em 2100 no cenário 8.5 mostra uma região correspondente a mais de 50% da área urbana de Manaus com células secas (Figura 22 C). Enquanto no RCP 4.5 (Figura 22 A e B), o ritmo de ampliação da zona rebaixada foi reduzido, muito embora a intensidade do rebaixamento tenha se acentuado. Em ambos os modelos há a perspectiva de um rebaixamento acentuado, prejudicando principalmente os pequenos usuários, que em geral

possuem poços menos profundos, de até 60 metros, com bombas submersas pouco potentes, em geral de 1 cv, de acordo com informação pessoal, obtida durante processo de limpeza de poço e outorga de recursos hídricos.



**Figura 24: Projeção para o ano de 2100. A) Porção superior do aquífero no RCP 4.5; B) Porção inferior do aquífero no RCP 4.5; C) Porção superior do aquífero no RCP 8.5; D) Porção inferior do aquífero no RCP 8.5.**

### 6.11. Impacto econômico da redução do nível de água

Foram feitos cálculos para estimar o impacto econômico na obtenção de água por poços com a redução do nível de água. Para tanto, foram utilizados como referência um aumento na Altura Manométrica Total em 10 m.c.a, e um consumo de 20 m<sup>3</sup>/mês em uma casa de quatro pessoas, abastecida por água subterrânea, valor obtido através de contas de água de famílias manauaras e pelo PROCON/SP, que considera uma média de 5,4m<sup>3</sup>/mês/pessoa. Para uma indústria, foi considerada a utilização de uma bomba submersa de 10 CV, produzindo 16 m<sup>3</sup>/h, durante 6 h/dia, média obtida através dos dados do SIAGAS, por vinte dias em um mês, considerando apenas a jornada de segunda-feira a sexta-feira. Na residência, os dez metros de redução do nível de água gerariam um aumento de 500% no consumo energético residencial. Na indústria, o incremento na conta de energia

seria de 10% para cada dez metros de rebaixamento do nível de água. Ou seja, se houver o mesmo rebaixamento de 100 m.c.a., o aumento total é de 100%.

## **7. CONCLUSÃO**

A partir dos dados disponíveis sobre o Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus, foi possível realizar a previsão de cenários de alteração do recurso hídrico subterrâneo, utilizando como método o modelamento numérico hidrogeológico, colaborando para a adição de conhecimento a respeito das águas subterrâneas, atualizando o modelo apresentado em 2005 (SHAFT, 2005), comparando a projeção feita há pouco mais de uma década, com o cenário atual e realizando projeções a partir de dados sócio-econômicos e ambientais, fornecidos por órgãos governamentais nacionais e estudos realizados por pesquisadores ligados à Organização das Nações Unidas e Organização Meteorológica Mundial.

Nota-se a tendência do fluxo regional com direção nordeste para sudoeste, com uma área central de concentração de fluxo. Esta área central apresenta os menores valores de coluna hidrostática, como consequência, o nível potenciométrico também é menor. Na região norte os níveis mais rasos ocorrem devido às zonas de recarga e à menor densidade habitacional, diretamente ligada ao número de poços presentes. A região sul possui níveis de água menos profundos, mesmo com uma grande densidade populacional em alguns locais, como a zona oeste, incluindo toda a orla da Ponta Negra, causado principalmente pelo abastecimento do aquífero pelo Rio Amazonas.

Em todos os cenários analisados, tanto em projeções pessimistas quanto otimistas mostram um rebaixamento acentuado e contínuo ao longo dos anos, evidenciando o uso inadequado do recurso. Avaliando do ponto de vista da sustentabilidade há a configuração da superexploração, uma vez que a constante redução no nível de água ao longo dos anos demonstra que a quantidade de água retirada do aquífero é muito superior à capacidade de recarga, e mesmo nos cenários mais otimistas as projeções são da continuidade do rebaixamento e agravamento da situação. Da parte ambiental são necessários mais estudos para averiguar se e onde ocorre a inversão de fluxo entre o aquífero e os igarapés, podendo desta forma levar água contaminada dos cursos de água que cortam a

área urbana de Manaus para dentro do AAC, reduzindo a qualidade da água e levando contaminantes para poços residenciais, industriais e os poços de abastecimento público.

Os resultados gerados no presente trabalho e em trabalhos anteriores como Saraiva (2015) e Shaft (2005) indicam o cenário de superexploração e insustentabilidade no uso do Aquífero Alter do Chão em Manaus, analisando tanto a vertente econômica quanto a ambiental. A continuidade no ritmo de exploração do AAC pode levar à redução intensa do nível de água, prejudicando os usuários e iniciando disputas pelo direito do uso da água. Todas as indústrias do Polo Industrial de Manaus possuem poços. A escassez de água ou a diminuição da sua qualidade pode impactar negativamente seus custos de produção, caso a água seja um insumo relevante no processo fabril.

Portanto, seja por fatores puramente sociais, seja por fatores sócio-econômicos, continuar a estudar o Aquífero Alter do Chão em Manaus é fundamental. Com base em uma compreensão detalhada de como ocorrem as entradas e saídas de água, quais são as direções de fluxo geradas, como é a relação entre água subterrânea e superficial, será possível desenvolver um plano de gestão que considere as mudanças econômicas e sociais em diferentes cenários, e garanta o uso contínuo da água subterrânea. Caso isto não seja feito, a escassez de água subterrânea e/ou deterioração de sua qualidade podem se tornar em um fator de geração de problemas sociais, de restrição de desenvolvimento da cidade e do Estado do Amazonas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A CRÍTICA. Manaus, 08 out. 2013. Disponível em: <<http://www.acritica.com/channels/manaus/news/falhas-no-abastecimento-de-agua-do-nova-cidade-irrita-moradores>>. Acesso em: 07 ago. 2016.
- ANDERSON, M. P., W. W. WOESSNER, 1992. Applied Groundwater Modeling, Academic Press.
- BERTOLO, REGINALDO ; HIRATA, RICARDO ; CONICELLI, B. ; Simonato, M ; PINHATTI, A. ; FERNANDES, A. . Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala?. Revista DAE, v. 63, p. 6-17, 2015.
- BRASIL, Banco Central do Brasil, Relatório Focus, Gerin, Brasília, 2017a. Publicação em meio eletrônico, p. 1-4. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/GCI/PORT/readout/readout.asp>> Acesso em: 02 mai. 2017.
- BRASIL. Carlos José Bezerra de Aguiar. CPRM. Relatório diagnóstico do Aquífero Alter do Chão no estado do Amazonas Bacia Sedimentar do Amazonas. Manaus: CPRM, 2012. 6 v.
- BRASIL. CPRM (Ed.). Carta hidrogeológica da cidade de Manaus: Relatório Preliminar. Manaus: CPRM, 2002
- BRASIL. Frederico Cláudio Peixinho. Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (Ed.). Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas. 2009. Disponível em: <<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 02 fev. 2017.**
- BRASIL. IBGE (Ed.). Estimativas de população para 1º de julho de 2015. 2015. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2015/estimativa\\_2015\\_TCU\\_20160712.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_2015_TCU_20160712.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2016.
- BRASIL. IBGE (Ed.). Produto Interno Bruto 2013. 2013a. Disponível em: <<ftp://http://ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2013/default.shtm>>. Acesso em: 11 ago. 2016.
- BRASIL. INMET (Org.). Temperatura Média Compensada. 2014. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 15 ago. 2016.
- BRASIL. Josias Barbosa de Lima. Cprm - Serviço Geológico do Brasil (Org.). Sistema de Informação de Águas Subterrâneas. 2009. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 08 jan. 2017.**

- BRASIL. Suframa. Modelo Zona Franca. 2014. Disponível em: <[http://www.suframa.gov.br/zfm\\_turismo\\_manaus.cfm](http://www.suframa.gov.br/zfm_turismo_manaus.cfm)>. Acesso em: 9 ago. 2016.
- BRITO, Alderlene Pimentel de. Elaboração de modelo numérico de fluxo de água subterrânea para uma microbacia de água clara na Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus - AM. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.
- BRUNDTLAND, G.M. et al. (1987). Our common future. World Commission on Environment and Development. Oxford University Press.
- CHATTON, E. ; LUDWIG, R. ; AQUILINA, L. ; Petelet-Giraud, E ; CARY, L. ; BERTRAND, G. ; LABASQUE, T. ; HIRATA, RICARDO ; MARTINS, Veridiana ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; VERGNAUD, V. ; AUROUET, A. ; KLOPPMANN, WOLFRAM ; PAUWELS, HÉLÈNE . Glacial recharge, salinisation and anthropogenic contamination in the coastal aquifers of Recife (Brazil). Science of the Total Environment, v. 569-570, p. 1114-1125, 2016.
- CORDANI, U.G.; TASSINARI, C.C.G.; KAWASHITA, K. 1984. A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. Ciências da Terra, 9: 6-11.
- CUNHA P.R.C., GONZAGA F.G., COUTINHO L.F.C., Feijó F.J. 1994. Bacia do Amazonas. Bol. Geoc. Petrobr., 8(1):47- 55.
- CUNHA P.R.C., MELO J.H.G., SILVA O.B. 2007. Bacia do Amazonas. Boletim Geoc. Petrobras, 15(2):227-251.
- CUSTODIO, E. (1992). Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. Selected Papers on Aquifer Overexploitation. Intern. Assoc. of Hydrogeologists, Heise, Hannover, 3: 3-28
- CUSTODIO, Emilio. The complex concept of overexploited aquifer. 2.ed. Madrid: Realigraf, 2000. 63 p.
- DE MARSILY, G., 1986. Quantitative hydrogeology, groundwater hydrology for engineers. Academic Press: 440 pp. Nova Iorque.
- DELGADO, S. (1992). Sobreexplotación de acuíferos: una aproximación conceptual. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Asoc. Española de Hidrología Subterránea. 25: 469-476.
- DINO, R., SOARES, E. A. A., ANTONIOLI, L., RICCOMINI, C., NOGUEIRA, A. C. R. 2012. Palynostratigraphy and Sedimentary Facies of Middle Miocene Fluvial. Journal of South American Earth Sciences, V. 34, p. 61-80

**DOHERTY, Jonh. Model Calibration and Uncertainty Analysis Using PEST. Neuchâtel: Chyn, 2015.**

**ESSINK, G.H.P. Oude. Groundwater Modelling. Utrecht: Centrum Voor Hydrologie Utrecht, 2000.**

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. USGS (Comp.). Water resources applications software: Summary of MODPATH. 2016. Disponível em: <[http://water.usgs.gov/cgi-bin/man\\_wrdapp?modpath\(1\)](http://water.usgs.gov/cgi-bin/man_wrdapp?modpath(1))>. Acesso em: 2 set. 2016.

FENSKE, J.P., LEAKE, S.A., PRUDIC, D.E., 1996, Documentation of a computer program (RES1) to simulate leakage from reservoirs using the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW): U.S. Geological Survey OpenFile Report 96-364, 51 p.

**FETTER, Charles W. Applied Hydrogeology. 4. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2001.**

FITTS, C. R. (2012). Groundwater Science (2nd ed.). San Diego, CA: Elsevier/Academic Press.

**G1 AMAZONAS. Manaus, 16 nov. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2015/11/falha-em-bomba-causa-problemas-de-abastecimento-de-agua-em-manaus.html>>. Acesso em: 07 ago. 2016.**

**G1 AMAZONAS. a. Manaus, 27 maio 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/05/mais-de-150-locais-de-manaus-ficarao-sem-agua-na-proxima-terca-31-veja.html>>. Acesso em: 07 ago. 2016.**

**G1 AMAZONAS. b. Manaus, 18 jul. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/07/bairros-de-manaus-ficam-sem-agua-apos-falha-em-bombas-de-captacao.html>>. Acesso em: 07 ago. 2016.**

**G1 AMAZONAS. c. Manaus, 30 ago. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/08/rompimento-de-tubulacao-deixa-mais-de-25-pontos-de-manaus-sem-agua.html>>. Acesso em: 12 set. 2016.**

**G1 AMAZONAS. d. Manaus, 10 set. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/09/vazamento-em-tubulacao-deixa-bairros-em-manaus-sem-agua.html>>. Acesso em: 12 set. 2016.**

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). The entropy law and the economic process. Harvard University Press, Cambridge.

GOODE, D.J., and Appel, C.A., 1992, Finite-difference interblocktransmissivity for unconfined aquifers and for aquifers having smoothly varying transmissivity: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4124, 79 p.

EM TEMPO. Manaus, 03 jun. 2016. Disponível em: <<http://www.emtempo.com.br/moradores-reclamam-a-falta-de-agua-em-varias-partes-da-cidade/>>. Acesso em: 07 ago. 2016.

ESSINK, Gualbert Oude. **Groundwater Modelling. Utrecht: Utrecht University, 2000. 201 p.**

HARBAUGH, A.W., 1992, A generalized finite-difference formulation for the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-494, 60 p.

HARBAUGH, A.W., BANTA, E.R., HILL, M.C., MCDONALD, M.G., 2000, MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model— User guide to modularization concepts and the ground-water flow process: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 p.

HILL, M.C., 1990, Preconditioned conjugate-gradient 2 (PCG2), a computer program for solving ground-water flow equations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4048, 43 p.

HIRATA, R.; UCCI, M. S. ; WAHNFRIED, Ingo ; VIVIANI, Juliana Baitz . A exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara (SP). *Geologia USP. Série Científica*, v. 12, p. 115-127, 2012.

HSIEH, P.A., FRECKLETON, J.R., 1993, Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 92-477, 32 p.

ITGE. 1991. Informe hidrogeológico para la mejoradelaabastecimiento a Solera (Jaén).

LEAKE, S.A., and Prudic, D.E., 1991, Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A2, 68 p.

LEAKE, S.A., LEAHY, P.P., NAVOY, A.S., 1994, Documentation of a computer program to simulate transient leakage from confining units using the modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-59, 70 p.

LEAKE, S.A., LILLY, M.R., 1997, Documentation of a computer program (FHB1) for assignment of transient specified-flow and specified-head boundaries in

- applications of the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW): U.S. Geological Survey Open-File Report 97-571, 50 p.
- LLAMAS, M.R. (1992b). Wetlands: an important issue in hydrogeology. Selected Papers on Aquifer Overexploitation. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise. Hannover: 3:69-86.
- LLAMAS, M.R.; CUSTODIO, E. (1985). El proyecto de Ley de Aguas. Instituto de Estudios Económicos. Madrid: 1-85
- MARGAT, J. (1992). Que est le concept de surexploitation utile à la gestion des eaux souterraines?. Hydrogéologie, Orléans, 4: 145-152.
- MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., ORR, B.R., ACKERMAN, D.J., 1992, A method of converting no-flow cells to variable head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 91-536, 99 p.
- MCDONALD, M.G.; HARBAUGH, A.W., 1988. A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, v.6.
- MENDES, Anderson Conceição; TRUCKENBROD, Werner; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 1, p.39-57, mar. 2012. Disponível em: <<http://sbg.sitepessoal.com/bjg/2012/n.1/d.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2017.**
- MIGUEZ, M. G., 2001 Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MIRANDA, Janaína Simone Neves. Caracterização da vulnerabilidade intrínseca do Aquífero Alter do Chão na cidade de Manaus - AM. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.
- NAVA, Daniel Borges. Mapa de vulnerabilidade aos processos erosivos da porção sudeste da cidade de Manaus, Amazonas. Manaus, 1999. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade do Amazonas. Centro de Ciências do Ambiente.
- ONU. Relatório de Desenvolvimento Humano (RDH). 2010. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/rdh2010/>>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- PALMA, Katherine Andrea León. Gênese e distribuição das silicificações aflorantes em Manaus. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

PORTO de Manaus. 2017. Disponível em: <<https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=nivel-do-rio-negro-hoje>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

PRUDIC, D.E., 1989, Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite difference, ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 88-729, 113 p.

**RITCHEY, Joseph D; RUMBAUGH, James O (Ed.). Subsurface fluid-flow modelling: Groundwater and vadoze zone. Denver: ASTM, 1996.**

SARAIVA, Mateus Alves. Evolução do nível de água do Aquífero Alter do Chão no município de Manaus, Amazonas, ao longo de quatro décadas. 2015. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

SANTOS, D.B.; FERNANDES, P.E.; DREHER, A.M.; CUNHA, F.M.B.; BASEI, M.A.S.; TEIXEIRA, J.B.G. 1975. Geologia. Folha SB.21.Tapajós. DNPM/Radam, v.7, p.15-116. (Relatório técnico)

SHAFT CONSULTORIA. Estudo Hidrogeológico da Cidade de Manaus: Relatório Final. Manaus: Águas do Amazonas, 2005. v.1.

SHERMAN, L. K. 1932. Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. Eng. News Rec., 501-505.

SOARES, Emílio Alberto Amaral; WAHNFRIED, Ingo; DINO, Rodolfo. Subsurface stratigraphy of the cretaceous-neogene sedimentary sequence of Manaus and Itacoatiara regions, Central Amazon. Geologia Usp. Série Científica, [s.l.], v. 16, n. 1, p.23-41, 7 abr. 2016. Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v16i1p23-41>.

SOUZA, L. S. B. & VERMA, O. P. 2004. Mapeamento de aquíferos em Manaus (AM) utilizando Perfilagem Geofísica de Poço. In: SIMP. DE GPR E SIMP. HIDROGEOFÍSICO, 1, Fortaleza. CD-ROM.

SOUZA, Lena Simone Barata; VERMA, Om Prakash. Mapeamento de Aquíferos na cidade de Manaus (AM) - utilizando perfilagem geofísica de poço e sondagem elétrica vertical. 2006. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

STEYAERT, L. T., 1993. A perspective on the state of environmental simulation modeling. In M.F. Goodchild, B.O. Parks, e L.T. Steyaert, eds., Environmental Modeling with GIS, pp. 16-30. Nova Iorque, Oxford University Press.

STREETER, V. L. ; WYLIE, E. B. Mecânica dos Fluidos. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1982.

SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J. B. L.; ZANOTTO, O.; WOLFF, S. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17(2):180-188, 1987.

**TAVARES, Amauri C et al. Reconstrução paleoambiental da formação Alter do Chão na área urbana de Santarém - PA. Xvi Congresso Brasileiro de Geoquímica. Búzios, p. 1-5. ago. 2017. Disponível em: <[http://sbgq.org.br/anaisXVIcongresso/2017\\_04\\_24\\_16\\_55\\_30.pdf](http://sbgq.org.br/anaisXVIcongresso/2017_04_24_16_55_30.pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2017.**

TEXAS. Steven C Young. Texas Water Development Board. Application of PEST to re-calibrate the groundwater availability model for the Edwards-Trinity (Plateau) and Pecos Valley aquifers. Austin: Texas WaterDevelopmentBoard, 2010.

YOUNG, R.A. (1992). Managing aquifer over-exploitation: economics and policies. Selected Papers on Aquifer Overexploitation. Intern. Assoc. of Hydrogeologists, Heise, Hannover.3: 199-222.