

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

THAINÁ FERREIRA DE SOUZA

MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DOS AQUÍFEROS ALTER DO CHÃO E
ALUVIONAR NA REGIÃO DE ANAVILHANAS, MUNICÍPIO DE NOVO AIRÃO, AM

MANAUS (AM)

2026

THAINÁ FERREIRA DE SOUZA

MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DOS AQUÍFEROS ALTER DO CHÃO E
ALUVIONAR NA REGIÃO DE ANAVILHANAS, MUNICÍPIO DE NOVO AIRÃO, AM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Geociências - PPGGEO da Uni-
versidade Federal do Amazonas como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em
Geociências

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Alderlene Pimentel de Brito.

Coorientador: Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried.

MANAUS (AM)

2026

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729m	Souza, Thainá Ferreira de Modelo Conceitual Hidrogeológico dos Aquíferos Alter do Chão e Aluvionar na região de Anavilhanas, município de Novo Airão, AM / Thainá Ferreira de Souza. - 2026. 99 f. : il., color. ; 31 cm. Orientador(a): Alderlene Pimentel de Brito. Coorientador(a): Ingo Daniel Wahnfried. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, 2026. 1. Interação entre águas subterrâneas e superficiais. 2. Testes hidráulicos. 3. Recarga de aquíferos. 4. Métodos geofísicos. I. Brito, Alderlene Pimentel de. II. Wahnfried, Ingo Daniel. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Geociências. IV. Título
-------	---

THAINÁ FERREIRA DE SOUZA

MODELO CONCEITUAL HIDROGEOLÓGICO DOS AQUÍFEROS ALTER DO
CHÃO E ALUVIONAR NA REGIÃO DE ANAVILHANAS, MUNICÍPIO DE
NOVO AIRÃO, AM

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.

Aprovada em: 06 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ALDERLENE PIMENTEL DE BRITO**
Data: 17/03/2026 15:32:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.^a Alderlene Pimentel de Brito, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ROGERIO BASTOS LEAL**
Data: 17/03/2026 15:51:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Luiz Rogério Bastos Leal, Membro.
Universidade Federal da Bahia, UFBA

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO LUIZ DA SILVA**
Data: 18/03/2026 00:33:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Márcio Luiz da Silva, Membro.
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, INPA

*A minha família, Altamiro, Sebastiana, Lúcia, Francisco e Maria Dulce,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por ser amparo e proteção.

Aos meus pais, em especial a minha vó, Maria Dulce (*in memoriam*), por todo o apoio incondicional. Todos os avanços ao longo da minha vida foram possíveis graças a vocês.

Ao meu parceiro de vida, Altamiro Rocha, que acompanhou todas as etapas e desafios ao longo da minha graduação e do mestrado. Seu apoio nos últimos trabalhos de campo foi essencial para a finalização desta pesquisa. Obrigada por permanecer mesmo embaixo das casas de caba, mesmo ouvindo esturro de onça, e por tirar a caranguejeira do piezômetro.

A minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Alderlene Brito, pela orientação e confiança depositada em mim para a realização deste trabalho. Gostaria de agradecer também por todos os conselhos, paciência e apoio para que esta dissertação fosse concluída.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Ingo Wahnfried, idealizador do projeto, por compartilhar seus conhecimentos sempre com humildade e paciência. Sua dedicação foi fundamental para a realização deste trabalho. Acredito que qualquer pessoa deveria ter a oportunidade de assistir a pelo menos uma aula sua — não desmerecendo a hidrogeologia, mas minha primeira recomendação certamente seriam seus comentários sobre o cenário geopolítico.

Ao grupo de pós graduandos da Hidrogeologia, futuros mestres e mestras, em especial à Thayná Maria, Roney, Antônia, Josely e Rubens pelo suporte na confecção dos pellets de bentonita, na organização dos campos e execução de coletas, nas discussões das dúvidas e também pelas caronas. Obrigada pela parceria, amei ter vocês ao meu lado.

Aos meus amigos do PPGGEO, Vivian, Márcia, Lorena, Carmem, Isabela, Yumi pela parceria ao longo do mestrado. Aos meus amigos Arcanjo e Iasmim pela ajuda com os erros nos códigos em Python e no Latex. E à Anais por ler com carinho meu texto em busca de erros gramaticais e por sempre me lembrar do valor de seguir a carreira acadêmica. Todos vocês me serviram de inspiração e motivação, minha eterna gratidão a todos.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao seu Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO), por toda a estrutura necessária no desenvolvimento desta Pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pela bolsa de estudo concedida que foi essencial para a conclusão dessa pesquisa.

À Ana Ruth e Leilane, que colaboraram nas análises realizadas no laboratório de Geoquímica da UFAM. Agradeço pela disponibilidade e pela atenção no esclarecimento de dúvidas e pela paciência na bagunça organizada do laboratório.

Ao Guilherme, colega do PPGGEO e servidor da SGB, agradeço pela atenção e por disponibilizar os dados de leitura da régua da estação de Novo Airão.

À empresa TRIONIC, pela iniciativa de nos conceder gratuitamente as sacas de bentonita em pellets, necessárias para a instalação do piezômetro em Anavilhanas. Se não fosse isso, talvez eu ficaria mais tempo fazendo à mão.

Aos trabalhadores da Associação Anavilhanas de Transporte Aquaviário de Novo Airão, em especial, ao Sr. Zeca, pela gentileza de verificar o nível do rio na área de estudo na época de enchente para nos informar da possibilidade de ir ao campo.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

*“O rio é caminho, estrada da vida, do povo amazônida. De contos e lendas, orgulho do
navegador...”*

(J. Carlos Portilho e Rui Machado)

RESUMO

O arquipélago de Anavilhanas, no rio Negro (AM), integra um sistema hidrogeológico complexo, e durante o El Niño de 2023-2024 os níveis recordes de baixa do rio afetaram tanto essa dinâmica quanto o acesso das populações amazônicas a serviços essenciais. Este estudo teve como objetivo elaborar um modelo conceitual hidrogeológico da área, avaliando a relação rio-aquífero-precipitação, os processos de recarga, as propriedades hidráulicas dos aquíferos locais e as características hidroquímicas e isotópicas das águas. Para isso, foi instalado um sítio de monitoramento com quatro piezômetros, dois localizados na ilha de Anavilhanas e dois na margem direita do rio Negro. Foi realizado monitoramento automático e manual dos níveis de água subterrânea entre julho de 2024 e outubro de 2025, associado a dados de cota do rio Negro e de precipitação local. A caracterização sedimentológica foi baseada em descrições e análises granulométricas dos sedimentos coletados a partir da instalação dos piezômetros. Testes hidráulicos e métodos granulométricos permitiram estimar a condutividade hidráulica e a recarga foi quantificada pelo método do balanço hídrico, complementado por seções de resistividade elétrica para análise da infiltração em subsuperfície. Amostras de água foram coletadas para análises físico-químicas e isotópicas. A junção de todos esses métodos possibilitou a criação de um modelo conceitual preliminar que mostrou a oeste, camadas silte-argilosas e arenosas em profundidade, que realizam contato com sedimentos arenosos fluviais depositados pelos rios ao longo do canal e das margens. À leste, as ilhas são compostas por uma camada silte-argilosa de 5 m sobreposta a sedimentos arenosos progressivamente mais grossos até 24 m, profundidade interpretada como transição para depósitos do leito do rio. A condutividade hidráulica variou entre 2.8×10^{-5} e 3.6×10^{-4} nas seções a 14 m e 30 m em Anavilhanas e 2.0×10^{-6} e 1.3×10^{-6} m/s na margem direita. Este conjunto forma um sistema aquífero com sistemas de fluxo: um raso, controlado pela topografia local da ilha e da margem do rio; um intermediário, que acompanha os sedimentos depositados na base das ilhas e o Canal do Rio Negro na direção NW-SE; e um profundo, no Aquífero Alter do Chão, com direção W-E. De meados de setembro de 2024 ao início de janeiro de 2025, o fluxo de água subterrânea raso na ilha recebeu recarga pluvial suficiente para gerar vazão de base para o Rio Negro. Durante o restante do período de monitoramento, o Rio Negro perdeu água para a porção rasa do sistema de fluxo de água subterrânea. A carga hidráulica do sistema de fluxo intermediário foi sempre inferior à do Rio Negro, fazendo com que este perdesse água continuamente. A recarga por precipitação foi de 11% (2022), 24% (2023) e 8% (2025), sem recarga em 2024, refletindo a redução das chuvas, o déficit hídrico acumulado e a diminuição do armazenamento na zona não saturada. Hidroquimicamente, as águas do aquífero mostraram maior mineralização em relação ao rio, com destaque para concentrações elevadas de ferro em nível raso. As assinaturas isotópicas indicaram origem meteórica, com variações sazonais associadas aos períodos de enchente e vazante.

Palavras-chave: Interação entre águas subterrâneas e superficiais; Testes hidráulicos; Recarga de aquíferos; Métodos geofísicos.

ABSTRACT

The Anavilhanas Archipelago, in the Negro River (AM), is part of a complex hydrogeological system, and during the 2023–2024 El Niño the river's record low levels affected both this dynamic and the access of Amazonian populations to essential services. This study aimed to develop a hydrogeological conceptual model of the area, evaluating the river–aquifer–rainfall relationship, recharge processes, the hydraulic properties of the local aquifers, and the hydrochemical and isotopic characteristics of the waters. To this end, a monitoring site was installed with four piezometers, two located on Anavilhanas Island and two on the right bank of the Negro River. Automatic and manual monitoring of groundwater levels was conducted between July 2024 and October 2025, associated with data on Negro River stage and local precipitation. Sedimentological characterization was based on descriptions and grain-size analyses of sediments collected during piezometer installation. Hydraulic tests and grain-size methods allowed estimation of hydraulic conductivity, and recharge was quantified using the water balance method, complemented by electrical resistivity sections to analyze subsurface infiltration. Water samples were collected for physicochemical and isotopic analyses. The integration of all these methods enabled the development of a preliminary conceptual model that showed, to the west, silty-clayey and sandy layers at depth, which come into contact with sandy fluvial sediments deposited by the rivers along the channel and margins. To the east, the islands are composed of a 5 m silty-clayey layer overlying progressively coarser sandy sediments down to 24 m, a depth interpreted as the transition to riverbed deposits. Hydraulic conductivity ranged between 2.8×10^{-5} and 3.6×10^{-4} at the 14 m and 30 m sections in Anavilhanas and 2.0×10^{-6} and 1.3×10^{-6} m/s on the right bank. This set forms an aquifer system with flow systems: a shallow one, controlled by the local topography of the island and the riverbank; an intermediate one, which follows the sediments deposited at the base of the islands and the Negro River Channel in the NW–SE direction; and a deep one, in the Alter do Chão Aquifer, with a W–E direction. From mid-September 2024 to early January 2025, shallow groundwater flow on the island received sufficient rainfall recharge to generate baseflow to the Negro River. During the remainder of the monitoring period, the Negro River lost water to the shallow portion of the groundwater flow system. The hydraulic head of the intermediate flow system was always lower than that of the Negro River, causing the river to continuously lose water. Recharge by precipitation was 11% (2022), 24% (2023), and 8% (2025), with no recharge in 2024, reflecting reduced rainfall, accumulated water deficit, and decreased storage in the unsaturated zone. Hydrochemically, the aquifer waters showed higher mineralization compared to the river, with notably elevated iron concentrations at shallow levels. Isotopic signatures indicated meteoric origin, with seasonal variations associated with flood and low-water periods.

Keywords: Groundwater–surface water interaction; Hydraulic tests; Aquifer recharge; Geophysical methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma dos dados constituintes de um modelo conceitual.	22
Figura 2 – Diagrama conceitual para uma região específica que mostra as composições isotópicas típicas de vários corpos d’água correlacionadas com a LEL (Linha de Evaporação Local), LMWL (Linha da Água Meteorica Local) e GMWL (Linha da Água Meteorica Global.	25
Figura 3 – Mapa de localização do Parque Nacional de Anavilhanas (PNA).	27
Figura 4 – Mapa geológico da região do Arquipélago de Anavilhanas.	29
Figura 5 – Instalação e configuração dos piezômetros utilizados no monitoramento. A – NAI-PZ01. B – NAI-PZ02. C - NAI-PZ03. D - NAI-PZ04. E – Perfuração por sondagem rotativa. F – Perfuração por trado manual. G - Filtro com 1 m de comprimento. H - Filtro com 50 cm de comprimento	35
Figura 6 – Procedimentos executados na análise granulométrica. A – Descrição dos sedimentos a cada metro perfurado do NAI-PZ01. B – Amostras provenientes da perfuração a trado do NAI-PZ02. C – Secagem das amostras na estufa. D – Destorroamento das amostras com a utilização do pistilo de cerâmica. E – Aplicação do método da pipetagem apenas com grãos menores que 2 mm. F - Separação dos grãos de fração areia.	36
Figura 7 – Gráfico de condutividade hidráulica (K) em função do tamanho do grão (mm). A equação para cada uma das cinco linhas é mostrada na forma da equação (unidades em ft/dia).	37
Figura 8 – Ilustração da execução de slug e bail tests em um piezômetro. As setas em vermelho nos piezômetros indicam a direção de fluxo de água após a execução de cada teste hidráulico.	38
Figura 9 – Faixa de variação da condutividade hidráulica para diferentes materiais. . .	40
Figura 10 – Monitoramento do nível d’água (NA) nos piezômetros. A – Transdutor de pressão da marca HOBOS. B – Transdutor barométrico da marca HOBOS. C – Medição do nível estático com uma trena adaptada. D – Programação dos transdutores feita previamente utilizando o notebook e o software gratuito HOBOWare.	41

Figura 11 – Local do monitoramento da cota do rio Negro. A – Placa da Estação de coleta de dados hidrometeorológicos do município de Novo Airão, denominada “Novo Airão” e com código de nº 14900050. B - Régua de medição registrando 3.90 m de cota do rio Negro em 17 de outubro de 2024.	41
Figura 12 – Estimativa da elevação do nível de água (Δh) feita de forma gráfica, através da diferença de elevação entre o ponto mínimo extrapolado e o maior nível do próximo evento de subida da água subterrânea que se deseja avaliar. . . .	43
Figura 13 – Esquema do sistema de cabos com distância de 3 metros	48
Figura 14 – Imagens da leitura dos parâmetros físico-químicos nas águas subterrâneas e superficiais. A - Leitura dos parâmetros na água do rio Negro. B - Dados de pH e temperatura registrados pelo pHmetro HANNA.	49
Figura 15 – Processos executados para a coleta de água subterrânea. A - Desenvolvimento dos piezômetros . B – Coleta de água subterrânea.	50
Figura 16 – Teste de alcalinidade. A – Erlenmeyer com 25 ml de água coletada. B – Erlenmeyer contendo água coletada com as gotas do alaranjado de metila. C – Bureta graduada com HCl que gradualmente muda a cor da solução de laranja para vermelho.	51
Figura 17 – Dados de submissão do artigo científico à revista <i>Hydrogeology Journal</i> . .	52
Figura 18 – Parâmetros físico-químicos das amostras de água do rio Negro e de água subterrânea.	78
Figura 19 – Diagrama de Schoeller.	79
Figura 20 – Diagrama de Piper.	80
Figura 21 – Diagrama δ^2H - $\delta^{18}O$ com a reta meteórica global (Craig, 1961) e com a reta meteórica local (Pita <i>et al.</i> , 2018) com as amostras de água do rio Negro e das águas subterrâneas	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente α para diferentes tipos de solo e declividades.	44
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BH	Balanço Hídrico
ED	Estimativa Darcyana
ESC	Escoamento superficial
ETR	Evapotranspiração Real
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
K	Condutividade hidráulica
NE	Nível estático
P	Precipitação
PNA	Parque Nacional de Anavilhanas
R	Recarga
REL	Reta de Evaporação Local
RMG	Reta Meteórica Global
RML	Reta Meteórica Local
SGB	Serviço Geológico do Brasil
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
VNA	variação do Nível d'água

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	Desvio de uma amostra de água em relação a um padrão.
Δh	Diferença entre o ponto máximo da elevação do nível de água registrado no hidrograma e o ponto no mesmo tempo da curva extrapolada da última recessão.
Δh	Diferença potenciométrica da água entre os pontos de medição.
Δl	Distância horizontal entre dois pontos.
ΔARM	Variação no armazenamento de água na zona não saturada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Tipos de modelos hidrogeológicos	20
2.1.1	Modelo Conceitual	20
2.2	Isótopos estáveis 2H e 18O	22
2.2.1	Fracionamento isotópico	23
2.2.2	Reta Meteórica Global (RMG) e Reta Meteórica local (RML)	24
2.2.3	Efeitos isotópicos	25
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	27
3.1	Localização	27
3.2	Clima	28
3.3	Contexto Geológico	28
3.4	Contexto hidrológico e hidrogeológico	30
3.5	Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas	31
3.6	Contexto da hidroquímica isotópica	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Instalação dos piezômetros	34
4.2	Amostragem de sedimentos e determinação granulométrica	35
4.3	Determinação dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos	36
4.3.1	Testes de Laboratório	36
4.3.2	Testes Hidráulicos	38
4.4	Monitoramento dos níveis de água	40
4.5	Estimativa de recarga do aquífero	42
4.5.1	Variação do Nível de Água - VNA	42
4.5.2	Balanço Hídrico - BH	43
4.5.3	Estimativa Darcyana - ED	46

4.6	Tomografia Geoeletrica – ERT	47
4.7	Medição dos parâmetros físico-químicos e amostragem de água	48
4.8	Análise hidroquímica	50
4.8.1	Alcalinidade	50
4.8.2	Cátions e Ânions maiores	51
4.9	Análise isotópica	51
5	RESULTADOS	52
5.1	Artigo Submetido: <i>Hydrogeological Dynamics in Anavilhanas (AM) in Response to the Seasonality of the Negro River and to Extreme Events in 2023 and 2024</i>	52
5.2	Hidroquímica e Isotopia	78
6	DISCUSSÕES	82
7	CONCLUSÕES	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS TESTES HIDRÁULICOS	95
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	98

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental na sustentabilidade dos ecossistemas e no atendimento das demandas hídricas da sociedade (Ntona *et al.*, 2022). Esse recurso natural constitui uma fonte de água potável para um terço da população global (IAH, 2023). Além disso, contribuem para a manutenção dos ecossistemas aquáticos, fornecendo fluxos de base que auxiliam na estabilidade dos cursos d'água e na preservação dos habitats, especialmente em áreas onde as fontes superficiais são sazonais ou insuficientes para suprir a crescente demanda (Virgílio *et al.*, 2021).

Como componentes do ciclo hidrológico, as águas subterrâneas e superficiais constituem um único recurso e não componentes isolados, devendo, por isso, serem gerenciadas como partes integradas que se inter-relacionam (Silva, 2007). A compreensão das complexas interações entre esses componentes é essencial para um planejamento e gerenciamento sustentável dos recursos hídricos (Ntona *et al.*, 2022). Nesse contexto, a elaboração de modelos conceituais hidrogeológicos surge como uma ferramenta essencial para o entendimento dos aquíferos. Esses modelos permitem identificar fontes de recarga, taxas de escoamento de base e áreas críticas para a proteção dos recursos hídricos, além de auxiliar na previsão de cenários futuros de uso e disponibilidade de água (Anderson; Woessner; Hunt, 2015). A aplicação desses conhecimentos é particularmente relevante, considerando as variações climáticas que têm impactado significativamente a disponibilidade hídrica, como tem acontecido em alguns estados da Amazônia Ocidental (Liberato; Brito, 2010).

Nas últimas três décadas, a Amazônia tem enfrentado secas extremas, associadas às variações climáticas com eventos cada vez mais intensos e frequentes, como os ocorridos em 2005, 2010, 2015-2016 e 2023-2024 (Erfanian; Wang; Fomenko, 2017; Brito *et al.*, 2022). Esses fenômenos têm levado municípios a decretarem estado de calamidade pública. Em 2023 e 2024, o Amazonas esteve entre os três estados mais atingidos pela seca, afetando 598 mil pessoas (BRASIL, 2023). A diminuição dos índices de precipitação e o prolongamento das secas têm exposto os povos amazônidas, especialmente os ribeirinhos, a situações de extrema vulnerabilidade (Rocha; Andrade; Rezende, 2024).

Os impactos desses eventos climáticos são visíveis nas esferas social, econômica e ambiental. De acordo com Costa e Marengo (2023), as consequências são a alta mortalidade de

peixes e mamíferos aquáticos, perda de vegetação, aumento de incêndios e redução da produção agrícola. Além disso, a precariedade no acesso à água potável e as dificuldades de locomoção entre comunidades ou centros urbanos agravam o isolamento dessas populações, prejudicando a chegada de insumos e intensificando os desafios já existentes.

Compreender a interação entre as águas subterrâneas dos aquíferos locais e os rios amazônicos torna-se fundamental para o equilíbrio dos sistemas fluviais e a estabilidade dos recursos hídricos na Amazônia. Sobretudo no cenário das mudanças climáticas e eventos extremos, como as secas recorrentes que têm afetado a região, impactando tanto os ecossistemas quanto as comunidades locais. Portanto, torna-se essencial compreender as dinâmicas locais que influenciam a disponibilidade e a qualidade da água.

Neste contexto, a área de estudo deste projeto está situada no Arquipélago de Anavilhanas, considerado o segundo maior arquipélago fluvial do mundo, localizado na região do baixo curso do rio Negro, principal afluente da margem esquerda do rio Amazonas. Localizado nos municípios de Manaus e Novo Airão, no estado do Amazonas, este arquipélago abriga o Parque Nacional de Anavilhanas (PNA), unidade de conservação federal criada com o objetivo de preservar o arquipélago fluvial e suas diversas formações florestais (Marinho, 2019). Nesta região, afloram rochas da Formação Nhamundá, Formação Alter do Chão, que abriga o Sistema Aquífero Alter do Chão, e Depósitos aluvionares (Barbosa, 2015).

Estudar os processos hidrogeológicos e a interdependência entre os aquíferos locais, como o Alter do Chão, os Aluvionares e o rio Negro, além de identificar áreas de recarga, avaliar a disponibilidade hídrica e prever impactos das mudanças climáticas, pode servir de base para orientar políticas de gestão sustentável, garantir a segurança hídrica das comunidades ribeirinhas e preservar os ecossistemas aquáticos e terrestres da região.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é elaborar um modelo conceitual hidrogeológico dos aquíferos na região de Anavilhanas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos incluem:

- Determinar os parâmetros hidráulicos dos aquíferos na região de Anavilhanas;
- Analisar as relações isotópicas entre Aquífero Alter do Chão, Aluvionar e rio Negro;
- Quantificar o aporte de água dos aquíferos aluvionar e Alter do Chão para o rio Negro, levando em consideração as variações espaciais e temporais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tipos de modelos hidrogeológicos

Um modelo é uma representação de um sistema ou processo real e por isso, se torna uma ferramenta valiosa para analisar sistemas de águas subterrâneas (Assaad; LaMoreaux; Hughes, 2004). A determinação de modelos de circulação hídrica subterrânea resulta da necessidade do conhecimento aprofundado das características químicas e hidrogeológicas dos meios aquíferos devido à exploração do recurso hídrico subterrâneo (Lousada; Campos, 2005).

Em termos gerais, os modelos de águas subterrâneas podem ser divididos em modelos físicos (de laboratório) e modelos matemáticos (Anderson; Woessner; Hunt, 2015; Feitosa *et al.*, 2008). Os modelos físicos são utilizados em práticas de laboratório e foram empregados por um bom tempo, mas passaram a ser substituídos pelos modelos matemáticos. Ainda assim, podem ser utilizados para análise de fenômenos e processos que ainda não puderam ser descritos de uma forma matemática adequada (Feitosa *et al.*, 2008). Já os modelos matemáticos utilizam equações matemáticas para descrever o fenômeno físico e podem ser analíticos ou numéricos. Enquanto os modelos analíticos simplificam as equações de modo que a solução possa ser obtida por métodos analíticos, os modelos numéricos resultam em um sistema de equações (Feitosa *et al.*, 2008).

Dentre as diversas etapas que compõem a modelagem de um aquífero, o primeiro passo é a definição de objetivos, sucedida por uma modelagem conceitual (Feitosa *et al.*, 2008). Os modelos conceituais resumem o conhecimento hidrogeológico de uma área a ser modelada e, portanto, fornecem uma estrutura e confiabilidade para o projeto do modelo numérico (Lekula; Lubczynski; Shemang, 2018).

2.1.1 Modelo Conceitual

As duas primeiras etapas do fluxo de trabalho de modelagem envolvem estabelecer o objetivo e desenvolver o modelo conceitual. Neste tipo de modelo, procura-se conciliar a representação da realidade hidrogeológica da forma mais fiel possível, simplificando informações de campo que facilitem a aplicação do modelo numérico ou computacional (Feitosa *et al.*, 2008; Anderson; Woessner; Hunt, 2015).

Um modelo conceitual, para a maioria das modelagens de fluxo de águas subterrâneas, no mínimo, inclui informações sobre limites e hidroestratigrafia, propriedades hidrogeológicas,

direções de fluxo, fontes e sumidouros (Anderson; Woessner; Hunt, 2015). A representação desses elementos ocorre em seções transversais, diagramas e tabelas mostrando a distribuição de unidades estratigráficas e condições de contorno com direções de fluxo de águas subterrâneas, bem como quaisquer informações adicionais que auxiliem a conceituação (Lekula; Lubczynski; Shemang, 2018).

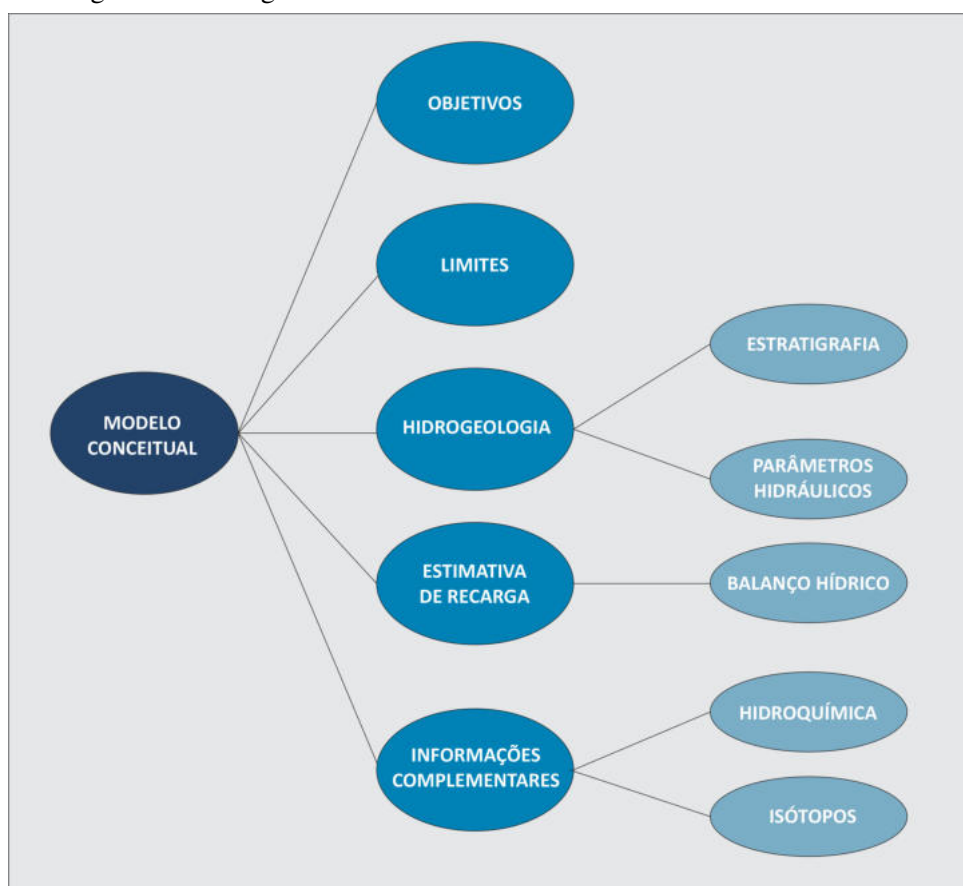
Dentre as propriedades hidrogeológicas, o modelo conceitual pode definir detalhes básicos do aquífero, como sua geometria, profundidade, espessura, alcance de condutividades hidráulicas, cargas hidráulicas e características do sistema. Essas propriedades influenciam o comportamento hidráulico, como corpos de água de superfície e poços de bombeamento (Brandenburg, 2021).

O modelo também deve apresentar uma estimativa de recarga baseada em campo dos componentes do balanço hídrico (Anderson; Woessner; Hunt, 2015). O conceito de balanço hídrico é avaliar a recarga direta, que é a precipitação que escapa do déficit de umidade do solo e do efeito da evapotranspiração e atinge o reservatório de água subterrânea por percolação vertical direta através da zona não saturada (Saad *et al.*, 2023). Em um cenário hidrogeológico tão complexo, a necessidade de um modelo conceitual hidrogeológico revisitado e de um balanço hídrico atualizado é uma questão urgente a ser abordada para evitar a superexploração de aquíferos (Petrone *et al.*, 2024).

De forma geral, qualquer informação que ajude a definir e restringir a conceituação é indispensável, como informações sobre química da água (Anderson; Woessner; Hunt, 2015). Análises que incluem isótopos geoquímicos e ambientais têm sido amplamente utilizadas para entender a origem e a evolução das águas subterrâneas em aquíferos. Modelos conceituais de funcionamento de aquíferos melhoraram por meio do uso dessas técnicas de interpretação (Silva; Rosario; Junior, 2020).

Logo, os modelos conceituais apresentam subsídios para o conhecimento dos aquíferos e para a gestão dos recursos hídricos (Ntona *et al.*, 2022; Trabelsi; Jothers, 2013). Apesar de o modelo conceitual ser uma simplificação dos processos hidrogeológicos, sua elaboração é considerada difícil, pois envolve a caracterização e integração de muitos dados (Figura 1). Essa sistematização demanda tempo e recursos para garantir que o modelo represente, de forma confiável, a realidade do sistema estudado (Lekula; Lubczynski; Shemang, 2018).

Figura 1 – Fluxograma dos dados constituintes de um modelo conceitual.



Fonte: Autor (2026)

2.2 Isótopos estáveis 2H e 18O

Um elemento químico é definido como um conjunto de átomos que possuem o mesmo número atômico, ou seja, têm a mesma quantidade de prótons em seus núcleos. Esses elementos possuem alguns isótopos possíveis, apresentando sempre o mesmo número de prótons, mas um número variável de nêutrons, que determina o isótopo. Por exemplo, o hidrogênio tem um próton, mas com números diferentes de nêutrons, ou seja, apresenta isótopos como o prótio, que não tem nêutrons, o deutério que tem um, e o trítio com dois nêutrons. O elemento oxigênio possui três isótopos estáveis, o ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O , todos com oito prótons, mas com oito, nove e 10 nêutrons, respectivamente.

Os isótopos podem ser estáveis, radioativos (decaimento em outro elemento) ou radiogênicos (produto do decaimento), ou ambos, radioativos e radiogênicos. Os isótopos radioativos são usados principalmente para medir idade e os isótopos estáveis, para entender as fontes de uma água, ou os processos físicos pelos quais ela passa desde que foi "formada", ou seja, desde que entrou no aquífero.

Por conta da diferença de massa entre os isótopos, ocorre o fracionamento isotópico, conhecido por processos que fazem com que as proporções isotópicas em fases ou regiões específicas se diferenciem umas das outras. Essas proporções possuem uma notação em forma de razão isotópica. As razões de isótopos são, por convenção, a razão entre o isótopo mais pesado (menos abundante) e o mais leve (mais abundante) e são relatadas como desvio a partir de um padrão internacional. No caso do hidrogênio e oxigênio na água, o padrão é o SMOW (Água Média Padrão do Oceano), criado por Craig (1961), mas existem outros padrões como, o VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) e o SLAP (Padrão de precipitação Antártica Leve), esta última é aplicada para águas naturais de latitudes, altitudes e temperaturas muito elevadas.

$$\delta^{18}O_{amostra-padrão} = \frac{{}^{18}O/{}^{16}O_{amostra}}{{}^{18}O/{}^{16}O_{padrão}} - 1 \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^2H_{amostra-padrão} = \frac{{}^2H/{}^1H_{amostra}}{{}^2H/{}^1H_{padrão}} - 1 \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

O delta grego minúsculo, δ , é usado para denotar o desvio de uma amostra em relação a um padrão. Quando uma amostra apresenta relativamente mais do isótopo pesado em comparação ao padrão, então o valor δ será maior que zero (amostra enriquecida), enquanto amostras relativamente empobrecidas no isótopo pesado terão valores negativos de δ (amostra empobrecida ou depletada). As variações nas razões de isótopos geralmente são bastante pequenas logo, esses valores são reportados em permil (partes por mil).

2.2.1 Fracionamento isotópico

O fracionamento pode associar-se ao efeito cinético (sem equilíbrio) ou ao efeito termodinâmico (com equilíbrio). De acordo com Jasechko (2019), o controle do fracionamento cinético está na velocidade das reações, por meio da energia de ativação delas. Isótopos mais leves possuem uma energia de dissociação menor, suas ligações podem se romper mais facilmente, ao contrário dos pesados. Já no fracionamento de equilíbrio, a temperatura mais elevada resulta em um menor grau de fracionamento, e vice versa. Neste caso, isótopos mais pesados são preferidos em posições de ligação com maior resistência, e isótopos mais leves, em ligações fracas. O fracionamento sob condições de equilíbrio está relacionado a processos de condensação, enquanto o fracionamento cinético está relacionado a processos de evaporação (Jasechko, 2019; Gastmans *et al.*, 2021)

2.2.2 Reta Meteórica Global (RMG) e Reta Meteórica local (RML)

Com base em amostras de água doce superficial de todo o mundo, Craig (1961) foi o primeiro a definir a Reta Meteórica Global (RMG) representada pela Equação abaixo.

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10 \quad (3)$$

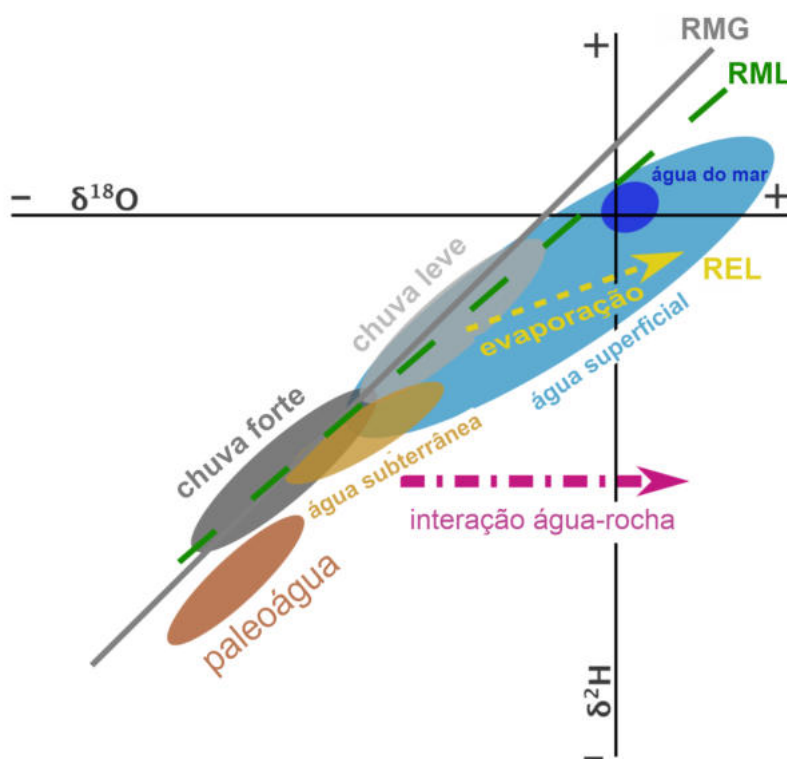
A RMG é utilizada para a plotagem de dados de amostras de precipitação locais, regionais ou globais, além de amostras de água superficiais e subterrâneas. A dispersão dos dados ao longo dessa reta pode ser influenciada por diversos processos ou fatores meteorológicos.

A reta meteórica de uma determinada região é denominada Reta Meteórica Local (RML) e geralmente é essencial para a interpretação de dados de isótopos estáveis. A comparação entre as águas subterrâneas, águas superficiais e eventos de precipitação específicos com a RML permite a investigação de processos como a interação água-rocha, a evaporação, a recarga e a mistura, conforme ilustrado na Figura 2.

Para serem representativas de eventos climáticos incomuns e oscilações climáticas, como o El Niño ou a Oscilação do Atlântico Norte, é aconselhável que a RML seja gerada a partir de amostras de precipitação que capturem toda a precipitação em uma região ao longo de vários anos. Podendo ser interpretada como a representação dos valores padrão ou de entrada dos isótopos estáveis no ciclo hidrológico local.

O diagrama conceitual, elaborado por Diamond (2022), mostra as composições isotópicas típicas de vários corpos d'água e as diferenças entre a Reta de Evaporação Local (REL), RML e RMG para uma região específica. Essas diferenças de inclinação e posição permitem a interpretação de dados de isótopos estáveis, de modo a iniciar a formulação de hipóteses sobre fontes e interações de água em uma região de estudo

Figura 2 – Diagrama conceitual para uma região específica que mostra as composições isotópicas típicas de vários corpos d'água correlacionadas com a LEL (Linha de Evaporação Local), LMWL (Linha da Água Meteórica Local) e GMWL (Linha da Água Meteórica Global).



Fonte: (Diamond, 2022)

2.2.3 Efeitos isotópicos

Existem alguns fatores, também chamados de "efeitos", que devem ser considerados para o entendimento do fracionamento isotópico. Esses fatores, ou efeitos isotópicos, são conhecidos como efeito da temperatura, efeito da latitude, efeito continental, efeito da altitude e efeito da quantidade (Diamond, 2022).

O efeito da temperatura apresenta uma correlação positiva entre a temperatura do ar e os valores de δ dos isótopos estáveis da precipitação local. Ou seja, valores de δ mais negativos correspondem às áreas com temperaturas mais baixas.

O efeito da latitude consiste na diminuição dos isótopos pesados em direção aos polos. Com temperaturas mais frias, os fatores de fracionamento são maiores, resultando em vapor relativamente mais empobrecido em isótopos mais pesados em comparação ao vapor formado acima dos oceanos tropicais.

O efeito continental se manifesta com uma diminuição dos valores de δ da precipitação

com a distância da costa. A precipitação progressiva causa valores cada vez mais negativos para a precipitação que ocorre mais para o interior.

O efeito altitude é causado principalmente pela precipitação, neste caso desencadeada por levantamento orográfico, bem como pela diminuição da temperatura, resultando em fatores de fracionamento maiores, o que impulsiona a precipitação de isótopos mais pesados e causa uma transição mais rápida para isótopos mais leves com a altitude.

O efeito da quantidade se manifesta como uma mudança para composições isotópicas mais leves para eventos de precipitação mais intensos. Primeiro, tempestades individuais intensas tendem a remover mais vapor e gotículas de água do ar e, portanto, com o aumento da precipitação em um local, a assinatura isotópica deve ficar mais leve. Segundo, o ar abaixo da base da nuvem ficará gradualmente mais saturado e frio, à medida que a chuva e o ar proveniente de camadas superiores da nuvem descem (a corrente descendente), o que reduzirá o enriquecimento evaporativo da gotas de chuva subsequente. Esse efeito é mais pronunciado em baixas latitudes.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A área de estudo está localizada na região do Arquipélago de Anavilhanas no município de Novo Airão, no estado do Amazonas (Figura 3), onde está localizado o Parque Nacional de Anavilhanas (PNA), inicialmente criado como Estação Ecológica (ESEC) pelo Decreto nº 86.061, de 02 de junho de 1981, tendo sido recategorizado para Parque Nacional (PARNA) pela Lei nº 11.799, de 29 de outubro de 2008.

Figura 3 – Mapa de localização do Parque Nacional de Anavilhanas (PNA).



Segundo o ICMBio (2017), o PARNA Anavilhanas é considerado o segundo maior agrupamento de ilhas fluviais do mundo, com 400 ilhas e 60 lagos, aproximadamente 130 km de extensão e em média 20 km de largura, representando 60% da unidade, enquanto a porção de terra firme representa 40%, em um total de 350 469.8 ha (3 504.70 km²).

O acesso à área, a partir de Manaus, é realizado pela ponte sobre o rio Negro que liga Manaus ao município de Iranduba, e, após a ponte, pela rodovia Manuel Urbano - AM-070 (Manaus-Manacapuru). No km 83, após o balneário do Miriti, toma-se a rodovia AM-352

(Manacapuru-Novo Airão) até o município de Novo Airão, localizado a cerca de 90 km. O acesso às ilhas de Anavilhanas é feito em pequenas embarcações a motor, que ficam atracadas próximas ao porto fluvial da cidade e são utilizadas pelos turistas que frequentam a região.

3.2 Clima

O clima na região do PNA é classificado, na escala de Köppen, do tipo Af (Clima Tropical Chuvoso) e é produto da combinação de vários fatores, como a circulação atmosférica, cobertura vegetal e o balanço de energia controlado pela disponibilidade de energia solar (ICMBio, 2017). A combinação de três sistemas de circulação atmosférica define o clima na região do PARNA com massas de ar equatorial, sistemas de correntes do norte e os de correntes do sul (Alves, 2013).

A série histórica de precipitação entre 1981 e 2019 (38 anos), estimada por satélites (CHIRPS v.2), indica que a média anual de precipitação na área de Anavilhanas foi cerca de 2200 mm/ano, indicando maior precipitação nos meses entre abril e junho e menores, entre setembro e novembro (Marinho, 2019). Já os dados do período entre 1983 e 2022 da estação pluviométrica de Novo Airão mostraram uma precipitação média anual de 2108,16 mm, com maiores volumes entre janeiro e maio e menores entre julho e setembro (Queiroz *et al.*, 2024). Na região, a época chuvosa (novembro a maio), a temperatura é menor, não inferior à média mínima de 23°C, enquanto na estação seca (junho a outubro), a temperatura atinge valores maiores, não ultrapassando o valor médio máximo de 34°C (ICMBio, 2017).

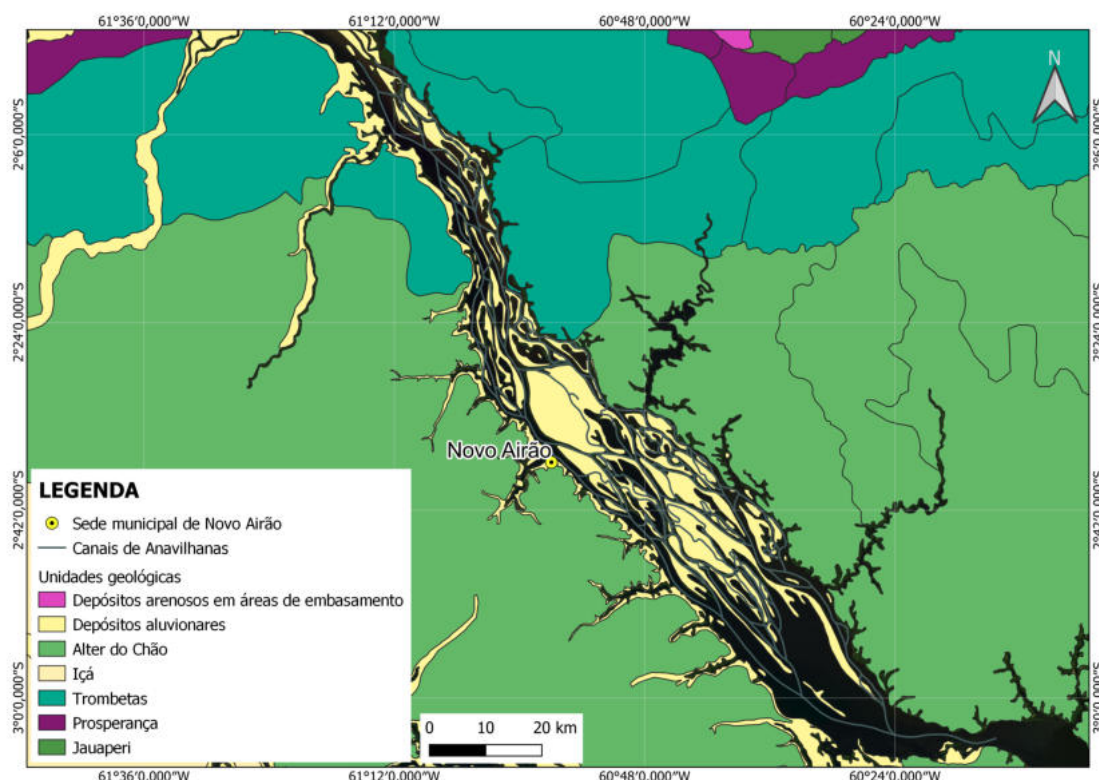
3.3 Contexto Geológico

O Arquipélago de Anavilhanas está inserido no contexto geológico da bacia sedimentar do Amazonas, uma bacia intracratônica de 500 000 km², que abrange parte dos estados do Amazonas e Pará. A Bacia do Amazonas é limitada a sul pelo escudo brasileiro e ao norte pelo escudo das Guianas, a oeste pela bacia do Solimões e a leste pela bacia do Marajó (Loureiro; Jannuzzi; Saudino, 2021; Caputo, 1984; Cunha; Melo; Silva, 2007).

Segundo Barbosa (2015), na região do Baixo rio Negro, afloram rochas da Formação Nhamundá, pertencentes ao Grupo Trombetas (Sequência Ordoviciano-Devoniana), rochas da Formação Alter do Chão, do Grupo Javari (Megassequência Mesozoica-Cenozoica), típicas de um sistema fluvial de alta energia, além de depósitos aluvionares quaternários (Figura 4).

A Formação Alter do Chão, a sul da bacia do rio Negro, de forma geral, consiste em arenitos argilosos vermelhos, siltitos e argilas. Classificações mais detalhadas incluem nesta formação, arenitos feldspáticos/cauliníticos, quartzo-arenitos e conglomerados com estratificações cruzadas, acanaladas e tabulares, que foram interpretadas como depósitos de canais fluviais com fácies subordinadas de siltitos, folhelhos e argilitos relacionados a ambiente lacustre (Caputo, 1984; Cunha; Melo; Silva, 2007).

Figura 4 – Mapa geológico da região do Arquipélago de Anavilhanas.



Bezerra (2003) descreve depósitos quaternários na região do médio rio Negro, ao norte de Anavilhanas, compreendendo aluviões fluviais compostos por areia, silte e argila não consolidados, bem como coberturas arenosas interfluviais com areias quartzosas brancas e amareladas não consolidadas, de granulometria fina a grossa, além de aluviões em terraços holocênicos, compostos por areias, siltes, argilas e cascalhos não consolidados. Conforme relatado por Irion *et al.* (2010), os altos níveis do mar durante o Pleistoceno Médio e o Pleistoceno Superior ocorreram na deposição de sedimentos fluviais de granulação fina no vale recém-formado. De acordo com Soares *et al.* (2017), os sedimentos não consolidados do vale do rio Negro têm aproximadamente 30 m de espessura e consistem em camadas intercaladas de areia e lama (silte e argila), possivelmente datadas do Pleistoceno Superior-Holoceno. Esses depósitos são sobrepostos por uma unidade muito fina (estimada entre 10 e 30 cm), que estabelece um contato

irregular e erosivo com o substrato subjacente, composto por intercalações pelíticas (siltitos e argilitos) e camadas de arenitos vermelhos e esbranquiçados de idade neógena, possivelmente associadas a depósitos fluviais da porção superior da Formação Alter do Chão.

As ilhas de Anavilhanas são descritas por Franzinelli e Igreja (2002) como uma série de ilhas compostas por argila e silte cinza-amarelados e, mais raramente, areia fina laminada com coloração vermelha. (Cunha, 2017) classifica três fácies para essas ilhas do Holoceno: lama rica em matéria orgânica (fácies basal), sedimentos arenosos (fácies intermediária) e lama oxidada (fácies superior).

Segundo Franzinelli e Igreja (2002), o rio Negro, no setor do Arquipélago de Anavilhanas, compreende dois domínios estruturais distintos que controlam sua fisiografia: um domínio de falhas normais localizado na margem esquerda e um domínio de falhas dextrais na margem direita. O domínio de falhas normais mantém e direciona o fluxo dos principais afluentes (NE-SW) de leste para oeste, e de afluentes menores orientados NW-SE em direção sudoeste e sudeste. O domínio de falhas dextrais consiste em falhas de deslizamento lateral dextrais N45W e falhas secundárias dispostas em echelon na direção N70E, promovendo um fluxo fluvial predominantemente de oeste para leste. Segundo Latrubesse e Franzinelli (2005), o vale na margem direita é controlado principalmente por uma falha contínua com direção noroeste. Esses dois domínios foram modificados por um terceiro conjunto mais recente de falhas de deslizamento dextrais com orientação geral oeste-leste, resultando em uma bacia transtensional na parte sul da região, onde os canais dos rios Negro e Solimões são restritos..

Cinco unidades pedológicas foram identificadas na região de Anavilhanas. Monteiro (2023) fez a classificação dessas unidades de acordo com o tipo de solo, textura, química e mineralogia, assim como características do relevo. Os solos das ilhas de Anavilhanas foram classificados como arenosos e hidromórficos, com textura média, compostos por quartzo, caulinita, illita, feldspato potássico, gibbsita, mica, caracterizados como um gleissolo.

3.4 Contexto hidrológico e hidrogeológico

O Arquipélago de Anavilhanas está inserido na sub-bacia rio Negro, a qual abrange uma área de $696\,810\text{ km}^2$ correspondendo a 11.3% da Bacia Amazônica e que contribui com 14% em termos de vazão de água (Filizola *et al.*, 2011). O rio Negro é o segundo maior afluente do rio Amazonas, o maior contribuinte da margem norte do rio Amazonas, com uma bacia de drenagem de $65\,900\text{ km}^2$ e descarga média anual de $29\,000\text{ m}^3/\text{s}$, ele transporta, em média, 8

milhões de toneladas anuais de sedimentos suspensos, sendo 50% de sua carga constituída de matéria orgânica (Alves, 2013; Filizola, 1999).

Na região de Anavilhanas, o período de cheia ocorre entre os meses de dezembro e junho (pico de cheia). Em agosto e setembro, o nível da água reduz rapidamente, com máximo de vazante entre outubro e novembro. A variação sazonal média do rio Negro no Arquipélago é da ordem de 9.6 m, influenciando no volume de água dos lagos entre os períodos de águas baixas e altas, o que caracteriza uma variação de 10% em área (Silva *et al.*, 2020).

Em relação às águas subterrâneas, o Sistema Aquífero Alter do Chão (AAC) é o principal reservatório de águas subterrâneas da Bacia do Amazonas. O Aquífero do Alter do Chão ocorre no centro-norte do Pará, leste do Amazonas e extremo sul do Amapá, cobrindo aproximadamente $290\,500\text{ km}^2$ em sua porção livre e aflorante, e um total de $552\,155\text{ km}^2$ quando consideradas também as áreas subjacentes a outras formações (ANA, 2015). É classificado como livre próximo à superfície, mas também ocorre em condições semiconfinadas e confinadas (Pita *et al.*, 2018; Girard; Wahnfried; Trindade, 2023). Na cidade de Manaus, o AAC tem uma espessura saturada média de 160 m, e seus principais parâmetros hidrodinâmicos incluem valores médios de transmissividade de $4.7\text{ m}^2/\text{h}$; A condutividade hidráulica é de $2.9 \times 10^{-2}\text{ m/h}$; o gradiente de água subterrânea é da ordem de 0.002; e a velocidade de fluxo é de cerca de 2 cm/dia. Também em Manaus, Pita *et al.* (2018) encontrou uma porosidade efetiva de 9.9%.

Na Amazônia, os aquíferos aluviais são formados por sedimentos aluviais distribuídos ao longo das planícies de inundação dos vales dos rios, com extensões laterais que variam de alguns metros a dezenas de quilômetros (ANA, 2015). Costa (1986), ao tentar caracterizar os aquíferos aluviais, sugere que os depósitos aluviais devem ser analisados de forma integrada com os níveis de drenagem de águas superficiais e subterrâneas. No entanto, os aquíferos aluviais são inerentemente complexos devido aos variados ambientes deposicionais. Portanto, desenvolver um modelo de água subterrânea confiável para representar um aquífero aluvial não é trivial (Yin; Tsai; Kao, 2021).

3.5 Caracterização hidroquímica das águas superficiais e subterrâneas

O rio Negro é classificado como rio de água preta devido ao grande conteúdo de substâncias húmicas presente em suas águas (Junk, 1997). As primeiras informações geoquímicas que se conhecem sobre a Bacia do rio Negro foram reportadas nos anos de 1929 e 1956, por Paiva e Sioli, respectivamente. As águas pretas do rio Negro provêm da drenagem dos escudos das

Guianas e Brasileiro e sua cor escura é resultado de substâncias fúlvicas e húmicas dissolvidas, dando-lhe um caráter ácido, pH entre 3.8 e 4.9 (Sioli, 1967).

Dentre algumas características físico-químicas obtidas por Rios-Villamizar *et al.* (2020), destacam-se valores de pH entre 3.5 e 5.5; condutividade elétrica entre 3.75 e 28 $\mu S/cm$; cor da água entre 28.5 e 627 mg/Pt/L; substâncias húmicas de 2.3 a 71 mg/L. A transparência da água em Anavilhanas variou de 1.50 a 2.90 m no canal principal e, 0.30 a 1.20 m nos lagos, devido às substâncias húmicas dissolvidas. A temperatura média da água do canal variou de 30°C a 32°C durante o ano hidrológico, e nos lagos, acima de 35°C.

Moreira (2019) também determinou parâmetros físicos e químicos, bem como os elementos traço da água do rio Negro em Anavilhanas, evidenciando elevadas concentrações de matéria orgânica dissolvida, 7.41 a 13.52 mg/L, caráter ácido, pH entre 3.91 a 5.68; baixa concentração de sólidos em suspensão, 1.26 a 8.41 mg/L, baixa condutividade elétrica, 9.12 a 14.89 $\mu S/cm$, revelando a pobreza de sais dissolvidos em suas águas e o potencial redox indicando que o ambiente aquático de Anavilhanas varia de transicional para ambiente isolado da atmosfera com caráter ácido, 103.39 ± 26.49 mV. Os corpos hídricos naturais apresentam variações sazonais e diurnas, bem como estratificação vertical tendo amplitude de 28.00 a 32.29°C. Os valores de oxigênio dissolvidos, 3.73 a 10.21 mg/L, apresentaram concentrações abaixo do recomendado por órgãos governamentais.

Na busca de identificar a ocorrência de contaminações, a caracterização hidroquímica de aquíferos freáticos na área urbana de Novo Airão/AM realizada por Ribeiro, Wahnfried e Neto (2024) apresentou valores de temperatura no valor mínimo de 27°C e máximo de 30.4°C, com mediana 28.3°C; valores de pH entre 3.4 e 6.5, com mediana de 4.1, caracterizando águas mais ácidas do que a faixa de referência indicado na portaria MS 888/2021, que são valores entre 6.0 e 9.0 e valores de potencial de óxido-redução (Eh, ou ORP) que oscilaram entre -94 e 45.3 mV, com mediana de 20.6 mV, indicando predomínio de condições levemente oxidantes. O valor mediano para a condutividade elétrica (CE encontrado foi de 47.9 $\mu S/cm$, com mínima de 0.13 $\mu S/cm$, típica de água de chuva sem mineralização, e máxima de 248.9 $\mu S/cm$, alta para a porção rasa do Aquífero Alter do Chão, tendo em conta que a amostra foi coletada em poço com 26 m de profundidade, indicando que pode haver alterações geradas por contaminação antrópica, pois no trabalho de Pita *et al.* (2018) somente encontraram CE's desta ordem em poços com mais de 120 m de profundidade.

Segundo Pita *et al.* (2018), as águas do AAC, a oeste da cidade de Manaus, possuem duas

origens hidrogeoquímicas distintas relacionadas à geologia local. As águas da porção superior do aquífero (120 a 130 m de profundidade) de origem meteórica e pouco mineralizadas e águas mais profundas (acima de 130 m metros de profundidade), mais mineralizadas devido a um maior tempo de residência e processos de interação água-rocha intensos.

3.6 Contexto da hidroquímica isotópica

Os primeiros estudos com isótopos ambientais em uso hidrológico no Brasil datam do final da década de 60, início da década de 70 e tiveram como alvos principais o Nordeste brasileiro, a Amazônia e posteriormente a região Sudeste (Silveira; Júnior, 2002)

As pesquisas pioneiras na Amazônia envolvem a utilização dos isótopos ^{18}O e ^2H para o cálculo de vazão dos rios Negro e Solimões e estimativa da contribuição dos afluentes para o rio Amazonas, bem como no mapeamento da área de influência do rio Amazonas na bacia de Marajó. Posteriormente, os isótopos ^{18}O e ^2H são continuamente utilizados para estudar a origem do vapor de água responsável pelas chuvas na região amazônica por Dall'Olio *et al.* (1979) e Salati *et al.* (1979).

Estudos mais recentes envolvem o trabalho de Pita *et al.* (2018) que realizou análises isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ em alguns municípios a oeste da cidade de Manaus, resultando em uma reta meteórica local mostrando uma composição muito próxima dos rios Solimões e Negro com as águas meteóricas locais sem evidências de processos evaporativos. Bastos *et al.* (2025), em um estudo na Amazônia central, afirmou que os aquíferos permanecem como a principal fonte de fluxo de base, e que a urbanização altera a conectividade, mas não elimina o controle dos aquíferos, como também ressaltou divergências entre os parâmetros atuais e históricos da reta meteórica local de Pita *et al.* (2018), sugerindo a evolução de linhas de base isotópicas, impulsionadas tanto pelo clima quanto pelo uso do solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Instalação dos piezômetros

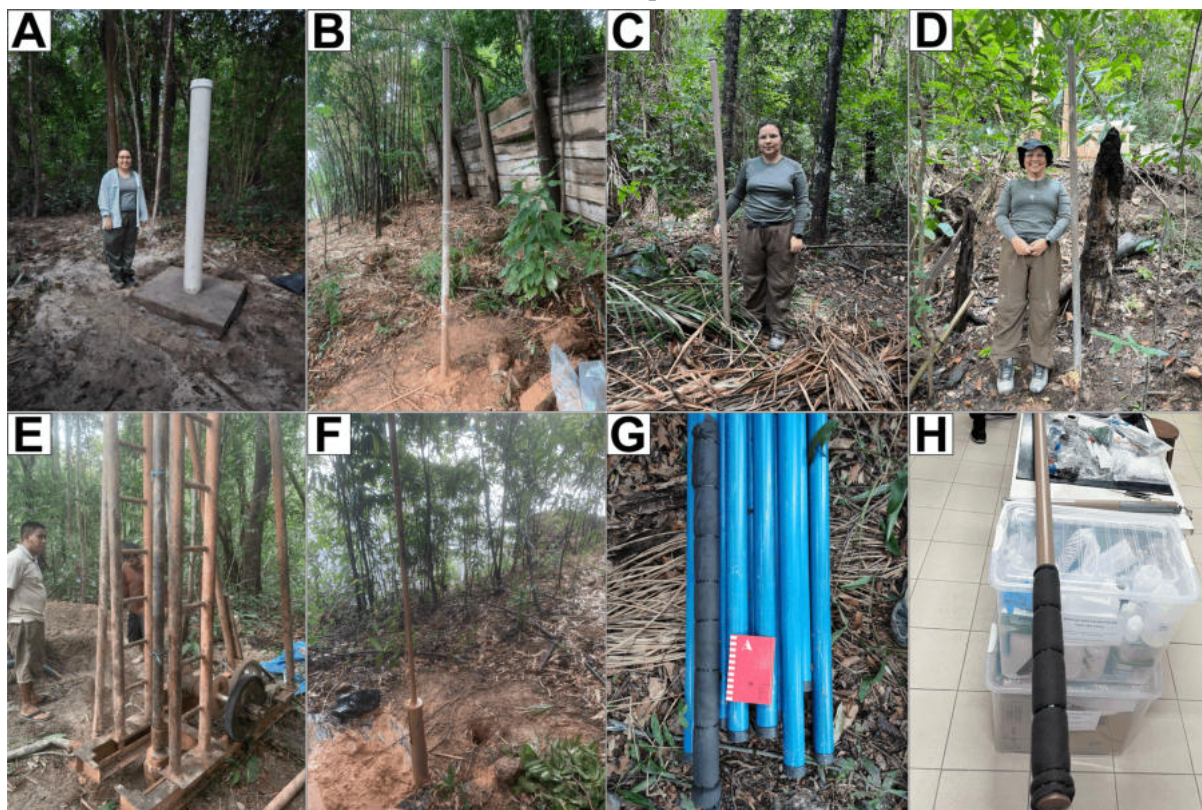
Para definir o local de instalação dos piezômetros na ilha de Anavilhanas, foi realizado um reconhecimento da área, levando em conta critérios de acessibilidade, condições do local e elevação do terreno. Durante o reconhecimento, foram observadas as marcas de inundação na copa das árvores, que indicam a cota de cheia, e as cotas altimétricas aproximadas foram registradas com o auxílio do aplicativo *Avenza Maps*. Esse processo foi essencial, uma vez que, durante a estação chuvosa e em eventos de cheia, as ilhas de Anavilhanas frequentemente ficam submersas, o que pode dificultar o acesso e o monitoramento dos piezômetros, caso eles fiquem submersos.

O sítio de monitoramento conta com quatro piezômetros instalados no período de 2024 e 2025. NAI-PZ01 e NAI-PZ02 foram instalados nos meses de abril e maio de 2024, respectivamente. Enquanto NAI-PZ03 e NAI-PZ04 foram instalados em abril de 2025. Anavilhanas conta com dois piezômetros, o NAI-PZ01, um piezômetro multinível com profundidades de 14 e 30 m, instalado por sondagem rotativa, e o NAI-PZ03, com 7 m de profundidade, instalado com trado manual. Já na margem direita do rio Negro, estão o NAI-PZ02, com 7 m de profundidade, e o NAI-PZ04, com 4 m de profundidade, instalados com trado manual.

Os procedimentos para a construção dos piezômetros envolveram a separação, montagem e higienização prévia dos materiais. Para a confecção dos filtros do piezômetro multinível NAI-PZ01, foram utilizados uma serra circular e dois tubos PVC de 60 mm de diâmetro. Os filtros consistem em uma porção de 1 m do comprimento de cada tubo com ranhuras espaçadas a cada 1 cm. A instalação dos demais piezômetros (NAI-PZ02, NAI-PZ03 e NAI-PZ04) seguiu a mesma preparação, porém com filtros de 50 cm de comprimento. Todos os tubos utilizados na instalação foram higienizados internamente e externamente com sabão neutro sem corantes e água corrente. Após a higienização, e com os tubos secos, apenas a porção dos tubos com as ranhuras foi envolta com uma manta geotêxtil, e esta foi fixada ao tubo com abraçadeiras de nylon.

Os materiais de preenchimento do furo no NAI-PZ01, após a colocação dos tubos PVC, foram sedimentos da própria formação, areia adquirida e bentonita em pellets, e contou com um tubo PVC extra para compreender os tubos internos. Para os demais, foram os sedimentos da própria formação.

Figura 5 – Instalação e configuração dos piezômetros utilizados no monitoramento. A – NAI-PZ01. B – NAI-PZ02. C - NAI-PZ03. D - NAI-PZ04. E – Perfuração por sondagem rotativa. F – Perfuração por trado manual. G - Filtro com 1 m de comprimento. H - Filtro com 50 cm de comprimento



A autora

4.2 Amostragem de sedimentos e determinação granulométrica

Durante a perfuração por sondagem rotativa e por trado, foram realizadas amostragens dos sedimentos a cada metro perfurado. Também foram feitas descrições tátil-visuais dos sedimentos e suas características texturais, granulométricas e de cor.

A preparação das amostras para a análise granulométrica seguiu a padronização feita por Almeida *et al.* (2012). A preparação inicial das amostras consistiu na secagem das amostras, realizada no Laboratório de Solos da Faculdade de Ciências Agrárias da UFAM, e o destorroamento e separação das amostras (fração menor que 2 mm) no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFAM. Para a determinação das frações de silte e argila, foi aplicado o método da pipetagem, e das frações de areia, pelo método do peneiramento, ambos realizados no Laboratório de análise e tratamentos de sedimentos e solos (LATOSSOLO) do Departamento de Geografia da UFAM.

Figura 6 – Procedimentos executados na análise granulométrica. A – Descrição dos sedimentos a cada metro perfurado do NAI-PZ01. B – Amostras provenientes da perfuração a trado do NAI-PZ02. C – Secagem das amostras na estufa. D – Destorroamento das amostras com a utilização do pistilo de cerâmica. E – Aplicação do método da pipetagem apenas com grãos menores que 2 mm. F - Separação dos grãos de fração areia.



4.3 Determinação dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos

Para a determinação da condutividade hidráulica (K) foram aplicados dois métodos distintos. O primeiro consiste na obtenção através dos métodos granulométricos, mais precisamente pelo método de Shepherd (1989) e o segundo envolve a determinação através de testes hidráulicos juntamente com o método de Hvorslev (1951).

4.3.1 Testes de Laboratório

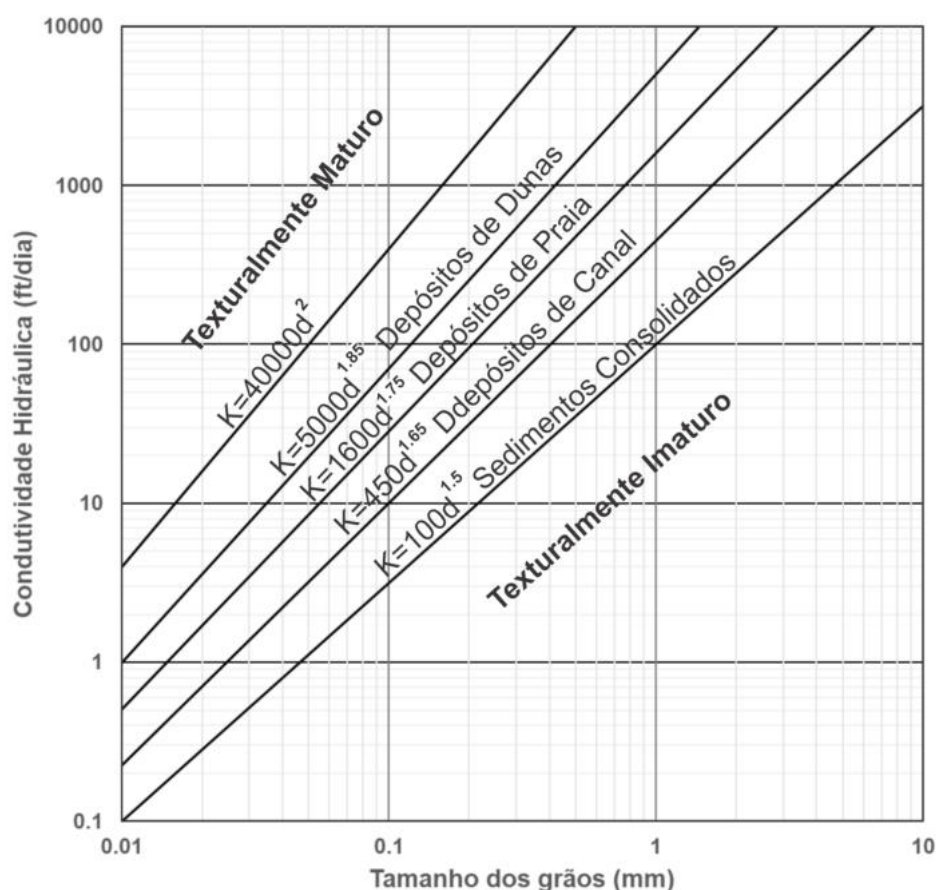
Shepherd (1989) realizou análises de regressão estatística utilizando 19 conjuntos de dados publicados e estabeleceu uma relação entre a condutividade hidráulica (K) e o tamanho de sedimentos não consolidados, que resultou na fórmula:

$$K = C \cdot (d_{50})^j \quad (4)$$

onde C é um fator de ajuste obtido experimentalmente, d_{50} é o diâmetro de 50% dos grãos (mm) e j é um expoente obtido experimentalmente que leva em consideração a textura dos sedimentos.

Shepherd (1989) estabeleceu uma relação gráfica generalizada entre o tamanho do grão e a permeabilidade, na qual os valores de C e do expoente j diminuem com a redução da maturidade textural.

Figura 7 – Gráfico de condutividade hidráulica (K) em função do tamanho do grão (mm). A equação para cada uma das cinco linhas é mostrada na forma da equação (unidades em ft/dia).



Fonte: Fetter (2001)

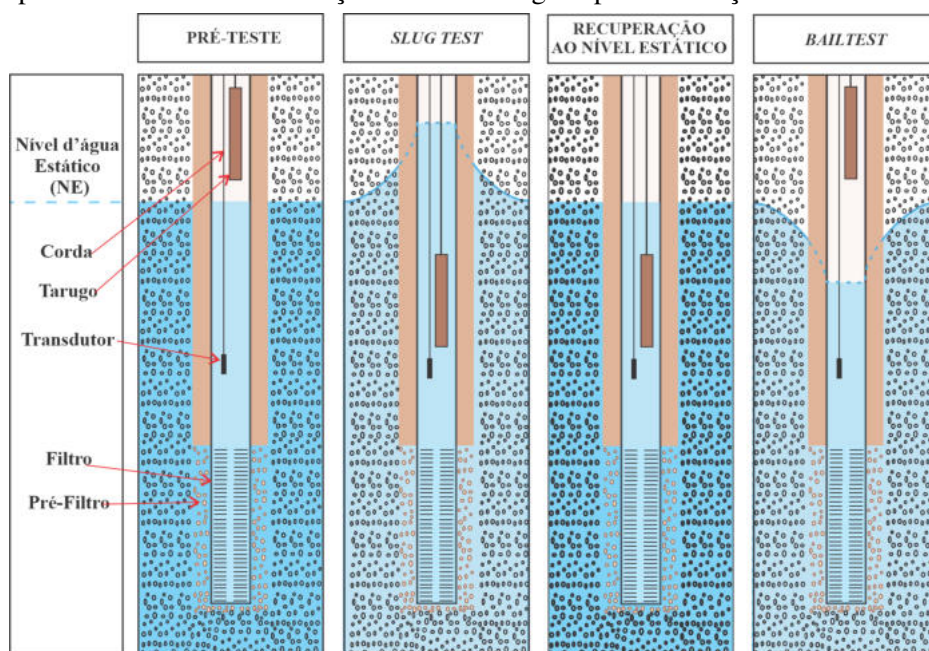
Para a aplicação deste método, curvas granulométricas foram elaboradas para cada amostra representativa das seções filtrantes, com a finalidade de determinar os diâmetros. A partir da Figura 7, os valores para o expoente e coeficiente correspondentes aos depósitos de canal imaturos foram adotados. Por último, os valores de condutividade em ft/dia foram convertidos em m/s, utilizando a relação $1 \text{ ftdia} = 3.53 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$.

4.3.2 Testes Hidráulicos

A determinação da condutividade hidráulica (K) é possível por meio da execução de ensaios denominados slug test e bail test (Fetter, 2001). O slug test é um método de teste de aquífero que compreende a inserção de um tarugo, que eleva o nível d'água no piezômetro, enquanto no bail test ocorre a remoção do tarugo e, conseqüentemente, causa o rebaixamento do nível d'água (Fetter, 2001; D'Oswaldo, 2017). Esta perturbação causada no nível d'água é registrada pelo transdutor de pressão previamente programado para fazer o registro dessa recuperação do nível dinâmico de água (ND) em função do tempo (t).

A sequência de execuções inicia-se com a medição do nível d'água estático (NE). Em seguida, o transdutor de pressão é programado para registrar a variação do nível d'água a cada segundo e, então, é colocado dentro do piezômetro com uma corda, assegurando-se de que ele permaneça dentro da coluna d'água, obedecendo à faixa de operação do equipamento (0 a 9 m de coluna d'água). É necessário que o tarugo, ao ser colocado dentro do piezômetro, não atinja o transdutor para não causar alterações nas medições. Após seguir todas essas diretrizes, coloca-se o tarugo, responsável por elevar o nível d'água, e aguarda-se o tempo necessário para a recuperação do nível dinâmico. Após a retirada do tarugo, que causa o rebaixamento do nível d'água, também espera-se a recuperação do nível dinâmico.

Figura 8 – Ilustração da execução de slug e bail tests em um piezômetro. As setas em vermelho nos piezômetros indicam a direção de fluxo de água após a execução de cada teste hidráulico.



Fonte: Adaptado de D'Oswaldo (2017)

Ao fim dos testes, o transdutor é conectado ao notebook e, através do software *HOBOWare*,

os dados registrados podem ser visualizados e exportados para o formato .csv. Com estes valores, será utilizado o método de Hvorslev (1951), considerando o contexto hidrogeológico e construtivo dos piezômetros e as premissas necessárias para a utilização deste método e assim, determinar a condutividade hidráulica (K).

O método de Hvorslev (1951) adota a Equação (5) para aquíferos confinados, homogêneos e isotrópicos. Pode ser utilizado em aquíferos livres, desde que o nível dinâmico esteja muito acima do filtro. Também assume que a extensão lateral do aquífero seja muito maior que a área de influência do teste e que o nível de água esteja horizontal antes do início do teste. O poço deve ser parcialmente penetrante, o comprimento do filtro deve ser mais de oito vezes o raio do furo do piezômetro ($L/r_w > 8$) e a inércia da água não pode causar oscilações cíclicas no nível dinâmico da água.

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{L}{r_w}\right)}{2Lt} \quad (5)$$

Sendo:

r_c : raio do piezômetro;

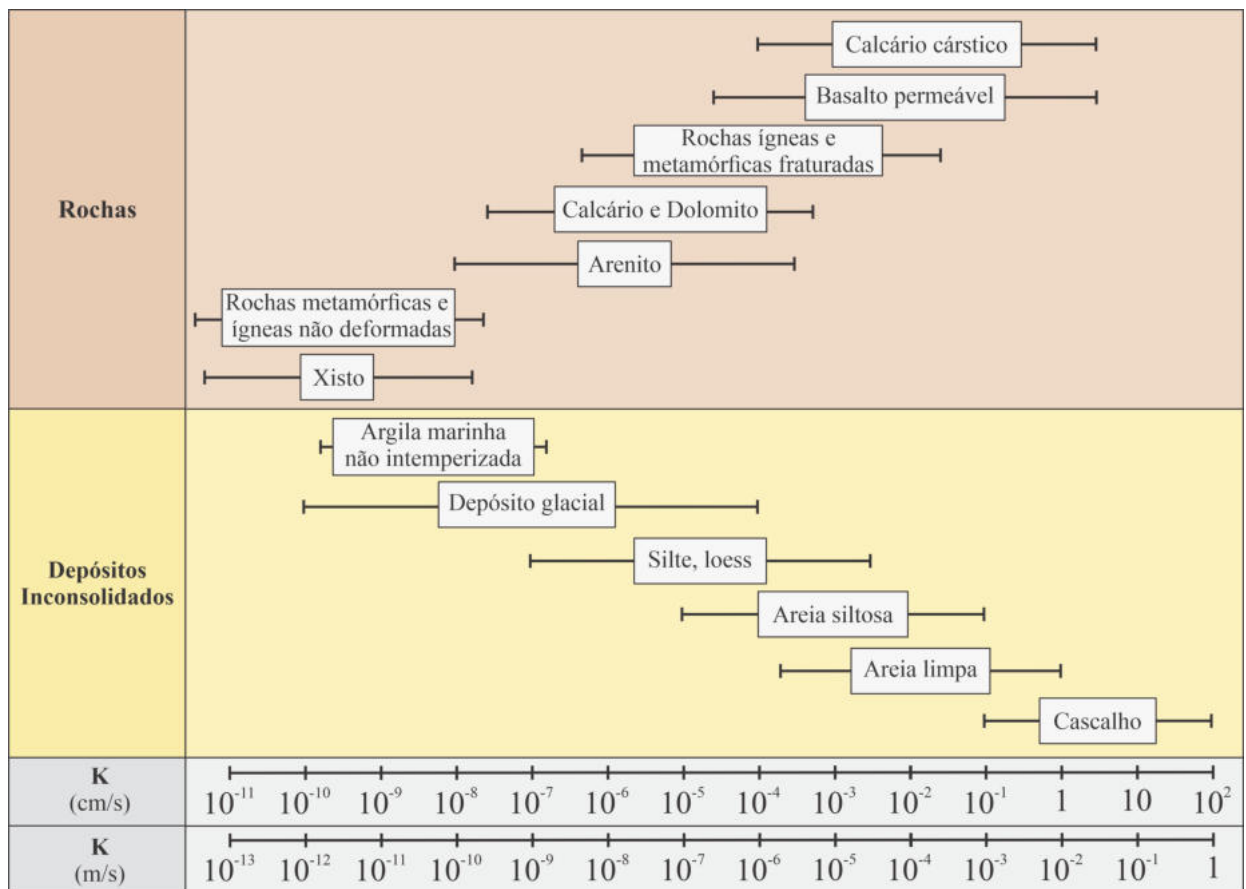
r_w : raio da perfuração;

L: comprimento do filtro;

$t_{0.37}$: tempo para que o nível d'água leva para subir ou descer a 37% da mudança inicial $(H - h)/(H - h_0) = 0,37$.

A partir dos valores de condutividade, pode ser feita uma comparação do valor com a Figura 9, que mostra a faixa de valores de condutividade hidráulica para diferentes materiais geológicos, rochas ou materiais inconsolidados.

Figura 9 – Faixa de variação da condutividade hidráulica para diferentes materiais.



Fonte: Adaptado de Feitosa *et al.* (2008)

4.4 Monitoramento dos níveis de água

O monitoramento dos níveis de água subterrânea foi feito de forma automática com a utilização de transdutores de pressão (Figura 10A). Os transdutores possuem memória interna, onde registram dados de pressão, que representam a soma da pressão da coluna de água com a pressão atmosférica. Também foi utilizado um transdutor de pressão barométrica para o registro da pressão atmosférica local. (Figura 10B).

Utilizando o software *HOBOb connect* no notebook, os transdutores foram configurados para realizarem leituras a cada 15 minutos. Através desse mesmo software, foi realizada a compensação barométrica dos dados de nível d'água. (Figura 10C). O monitoramento do nível nos piezômetros NAI-PZ01 e NAI-PZ02 iniciou no dia 28 de julho de 2024 e nos piezômetros NAI-PZ03 e NAI-PZ04, que foram instalados posteriormente, começou em abril de 2025.

Figura 10 – Monitoramento do nível d'água (NA) nos piezômetros. A – Transdutor de pressão da marca HOBOS. B – Transdutor barométrico da marca HOBOS. C – Medição do nível estático com uma trena adaptada. D – Programação dos transdutores feita previamente utilizando o notebook e o software gratuito HOBOWare.



O monitoramento da cota do rio Negro foi feito através da leitura da régua da estação hidrométrica nº 14900050 da Agência Nacional de Águas (ANA), posicionada em Novo Airão, realizada por morador do município (Figura 11A e 11B).

Figura 11 – Local do monitoramento da cota do rio Negro. A – Placa da Estação de coleta de dados hidrometeorológicos do município de Novo Airão, denominada “Novo Airão” e com código de nº 14900050. B - Régua de medição registrando 3.90 m de cota do rio Negro em 17 de outubro de 2024.



4.5 Estimativa de recarga do aquífero

Existem diversos métodos para a avaliação da recarga de um aquífero. Três métodos intitulados Variação do Nível D'água (VNA), Balanço Hídrico (BH) e Estimativa Darcyana (ED) (Wahnfried; Hirata, 2005; Brito; Wahnfried; Ferreira, 2021; Maldaner, 2010).

4.5.1 Variação do Nível de Água - VNA

O método VNA também é conhecido como *Water Table Fluctuation* (WTF) e se baseia na premissa de que a chegada da recarga na zona saturada de um aquífero causa o aumento do nível de água (NA) nesse aquífero. A análise dessa variação é viabilizada pelo monitoramento do nível d'água realizado por transdutores situados dentro dos piezômetros. De acordo com Maldaner (2010), o posicionamento espacial dos poços é fundamental para que o monitoramento seja representativo da área de estudo.

Este método possibilita a estimativa da recarga, desde que o volume de água adicionado ao aquífero seja maior que o volume que sai, ocasionando a elevação do nível d'água. Caso contrário, não haverá variação ou rebaixamento do nível d'água e a recarga não poderá ser estimada. Também é recomendado para aquíferos livres, com níveis de água rasos e com rápida resposta à recarga (recuperação rápida). Logo, os hidrogramas devem mostrar fortes subidas e descidas do nível d'água (Healy; Cook, 2002; Maldaner, 2010; Brito; Wahnfried; Ferreira, 2021).

A recarga (R) pelo método VNA é dada pela Equação de Healy e Cook (2002):

$$R = S_y \Delta h / \Delta t \quad (6)$$

Onde:

R = recarga (L);

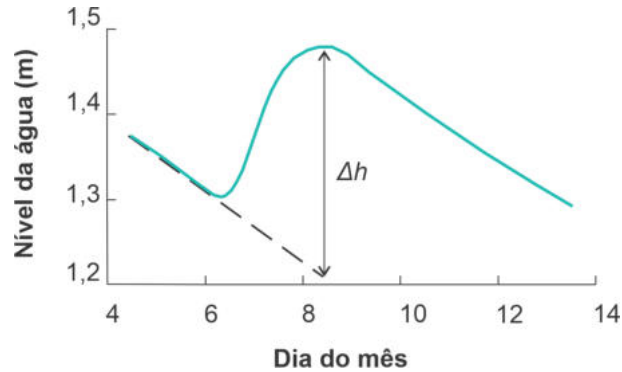
S_y = vazão específica (L^3/t);

Δh = diferença entre o ponto máximo da elevação do nível de água registrado no hidrograma e o ponto no mesmo tempo da curva extrapolada da última recessão (Figura 12);

Δt = tempo.

O termo S_y pode ser definido como a parte do volume armazenado em subsuperfície que é drenada sob a influência da gravidade. Uma formulação empírica para a avaliação do rendimento específico é a equação de Biecinski (Pazdro, 1983, apud Alvarez e Niedzielski (1996)) que relaciona o valor do rendimento específico com o valor da condutividade hidráulica através da seguinte expressão:

Figura 12 – Estimativa da elevação do nível de água (Δh) feita de forma gráfica, através da diferença de elevação entre o ponto mínimo extrapolado e o maior nível do próximo evento de subida da água subterrânea que se deseja avaliar.



Fonte: Adaptado de Brito, Wahnfried e Ferreira (2021)

$$S_y = 0117\sqrt[7]{K} \quad (7)$$

4.5.2 Balanço Hídrico - BH

O método do balanço hídrico (BH) para estimativa de recarga segue a definição de Thornthwaite e Mather (1955) (Equação (8)).

$$P = ESC + ETR + \Delta ARM + R \quad (8)$$

Ou seja, a recarga seria definida pela Equação (9)

$$R = P - ESC - ETR - \Delta ETR \quad (9)$$

Em que:

R = recarga do aquífero (mm).

P = precipitação (mm);

ESC = escoamento superficial (mm);

ETR = evapotranspiração real (mm);

ΔARM = variação no armazenamento de água na zona não saturada (em mm);

Os dados diários de temperatura foram obtidos por meio da versão *Hourly 2.4.9* do projeto *POWER*, utilizando as coordenadas da área de estudo (latitude: 2.6185 e longitude: -60.9261). Este projeto, denominado *Prediction Of Worldwide Energy Resources* (POWER) é desenvolvido pelo Centro de Pesquisa Langley (LaRC) da NASA e utiliza dados de satélite e o modelo de assimilação MERRA-2. Os dados diários de precipitação da estação pluviométrica

de Novo Airão nº 260006 foram disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil para este trabalho.

O escoamento superficial (ESC) pode ser obtido através das Equações (10) e (11) de Thornthwaite e Mather (1955).

$$ESC = C_s * P \quad (10)$$

$$C_s = \alpha * C \quad (11)$$

Onde:

C_s = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

P = precipitação mensal (mm);

α = valor determinado em função da declividade e da estação do ano, seca ou úmida;

C = coeficiente que determina o quanto de água precipitada escorrerá em superfície, em função do litotipo.

As variáveis que determinam o coeficiente de escoamento superficial (C_s) dependem de critérios como o tipo de solo, declividade do terreno e da estação do ano. Para a área de estudo, os meses de junho a novembro são os meses com baixa precipitação (estação seca) e os meses de dezembro a maio são de alta precipitação (estação úmida). Para isso, foi utilizada a Tabela 1 dos trabalhos de Wahnfried e Hirata (2005).

Tabela 1 – Coeficiente α para diferentes tipos de solo e declividades.

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente α	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso $C = 0.30$	0 a 2	0.17	0.34
	2 a 7	0.34	0.50
Argiloso $C = 0.40$	0 a 2	0.33	0.43
	2 a 7	0.45	0.55

A evapotranspiração potencial pode ser calculada de acordo com a faixa de valores de temperatura através das equações (12) ou (13) de Thornthwaite (1948).

$$ETP = 16b \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (0 < T < 26.5^\circ C) \quad (12)$$

$$ETP = -415.85 + 32.24T - 0.43T^2 \quad (T \geq 26.5^\circ C) \quad (13)$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial (mm)

T = temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$);

I = índice de calor disponível para a região;

a = função cúbica de I calculada a partir da soma dos índices de calor dos 12 meses;

b = fator de correção referente ao período de insolação durante o dia, que varia em função da latitude em que se localiza a estação meteorológica (no caso, $2^{\circ} 58'$ sul).

Aplicando as equações abaixo:

$$I = \sum i \quad (14)$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (15)$$

o termo a é a função cúbica de I:

$$a = (6.75 * 10^{-7} I^3) - (7.7 * 10^{-5} I^2) + (0.018 I) + 0.49 \quad (16)$$

O termo b é calculado da seguinte forma :

$$b = \left(\frac{ND}{30} \right) * \left(\frac{N}{12} \right) \quad (17)$$

Em que:

ND = número de dias no mês;

N = fotoperíodo, ou seja, quantidade de horas que a planta ficará exposta à luz conforme sua fase de desenvolvimento, em horas. Neste trabalho, considerou-se um fotoperíodo de 12 h, por conta da proximidade da área com o equador, o mesmo usado em Brito, Wahnfried e Ferreira (2021).

A variação de armazenamento de água na zona não saturada depende da quantidade inicial de água armazenada, cujos limites máximos (capacidade de campo) e mínimo (ponto de murchamento) variam em função do tipo de solo e sua espessura.

A água que efetivamente estará disponível para a recarga dependerá da espessura da camada do solo e da profundidade das raízes. Deve-se então, multiplicar a água disponível pela espessura para obter a capacidade de água disponível no solo (CAD). Para a determinação da CAD, foi utilizada a média municipal elaborada pela Agência Nacional de Águas em parceria com a Universidade Federal do Paraná (ANA; UFPR, 2021), referente ao município de Novo Airão $0.118 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

De acordo com a simplificação de Pereira (2005), que estabelece que para uma sequência de n meses, o armazenamento (ARM_n) ao longo desses meses será dado pela equação de

Mendonça (1958). Para os períodos (mínimo de dois meses, $n=2$) em que o total de chuvas (P) é menor que a evapotranspiração potencial (ETP) e a água retida torna-se uma função dessa demanda potencial ($P - ETP < 0$) e da CAD adotada, utiliza-se a Equação (18). Caso haja um ou mais meses com $P - ETP > 0$, mas com valores insuficientes para levar o ARM até o valor da CAD utiliza-se a Equação (19),

$$ARM_n = ARM_{n-1} \exp \left[\frac{(P - ETP)_n}{CAD} \right] \quad (P - ETP < 0) \quad (18)$$

$$ARM_n = ARM_{n-1} + (P - ETP)_n \quad (P - ETP > 0) \quad (19)$$

A variação de armazenamento (ΔARM) para cada mês se dá pela subtração do armazenamento do mês atual pelo mês anterior. A partir da determinação de cada um dos parâmetros que compõem o balanço hídrico, a Equação (9) pode ser utilizada para quantificar a recarga mensal.

4.5.3 Estimativa Darcyana - ED

O fluxo de base para o rio Negro será determinado pelo método de Darcy, através da obtenção do valor da velocidade darcyana média de fluxo de água (q), calculada pelas equações abaixo:

$$q = -Ki \quad (20)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (21)$$

Sendo,

K = condutividade hidráulica;

i = gradiente hidráulico;

Δh = diferença potenciométrica da água entre os pontos de medição, neste caso, dos piezômetros e o rio Negro;

Δl = distância horizontal entre os piezômetros e o rio Negro.

Para a determinação da diferença potenciométrica (Δh) foram utilizadas informações do perfil construtivo do piezômetro e as adquiridas na etapa de monitoramento do nível de água, combinadas com a cota do solo no local de cada piezômetro aplicadas nas Equações (22) e (23).

$$COTA_{NA} = COTA_{TERRENO} + H_{BOCA} - PROF_{NA} \quad (22)$$

Onde:

$COTA_{NA}$ é Cota do nível da água dos piezômetros;

$COTA_{TERRENO}$: cota do terreno obtida;

H_{BOCA} é altura da boca do piezômetro;

$PROF_{NA}$: profundidade do nível de água no piezômetro.

Em um aquífero freático, o fluxo se dá a partir das porções mais altas para as mais baixas do terreno. Neste trabalho, foram utilizadas as cotas da água medidas nos piezômetros e a cota da água no rio Negro no ponto mais próximo ao piezômetro na Equação (23).

$$\Delta h = COTA_{NA-PZ} - COTA_{NA-RN} \quad (23)$$

Onde:

Δh é a diferença entre as cargas hidráulicas em uma direção de fluxo;

$COTANA_{PZ}$ é a cota do nível de água no piezômetro;

$COTANA_{RN}$ é a cota do nível da água no rio Negro.

Com o monitoramento dos níveis d'água subterrânea nos piezômetros e das cotas do rio Negro, será determinado o gradiente hidráulico (i) através da Equação 18. Para a determinação da velocidade de fluxo (q), através da multiplicação do gradiente pela área da seção do aquífero hidraulicamente conectada ao rio, ou à zona de descarga do aquífero, determina-se a quantidade de água que chega até ao rio na forma de fluxo de base (Q).

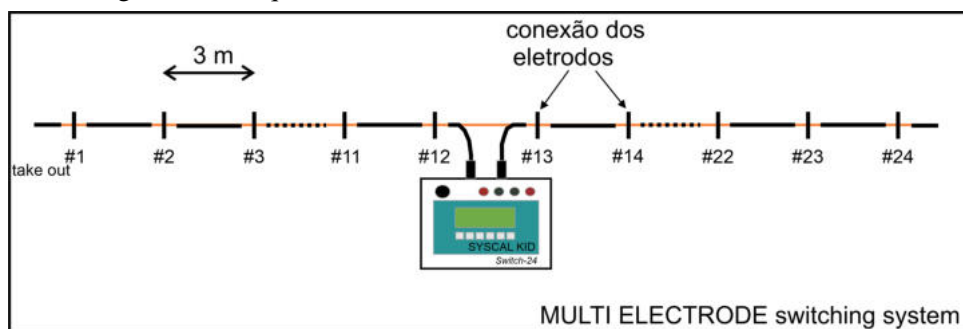
4.6 Tomografia Geoelétrica – ERT

A técnica da Tomografia Geoelétrica, também denominada de Imageamento Geoelétrico, é uma adaptação do caminhamento elétrico, com equipamentos mais sofisticados e com uma densidade elevada de medições de resistividade elétrica da subsuperfície e, portanto, um aumento na resolução dos dados (Gandolfo, 2007; Machado, 2008).

A execução em campo do levantamento pela ERT foi efetuada ao longo de perfis, e a apresentação dos resultados foi produzida em seções de resistividades com várias profundidades de investigação. Essas pseudo-seções de resistividades aparentes (dados observados) foram modeladas por um processo de inversão. Esse processo é feito por meio de softwares especiais e é aplicado para refinar e modelar os valores de resistividade obtidos, possibilitando uma imagem mais próxima da real distribuição dos materiais em subsuperfície.

O equipamento de tomografia geoelétrica utilizado foi o SYSCAL KID SWITCH-24 (IRIS Instruments), um equipamento composto por uma placa de comutação interna para 24 eletrodos, que possibilita a aquisição de imagens de resistividade. O equipamento possui dois cabos de alta resistência, que são conectados na parte traseira do medidor de resistividade, e cada

Figura 13 – Esquema do sistema de cabos com distância de 3 metros

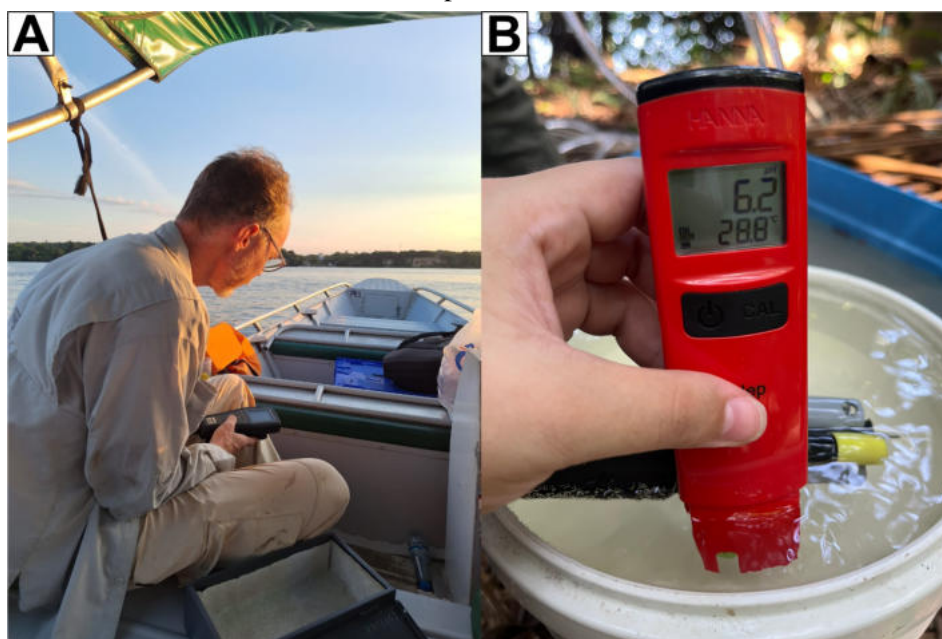


um possui 12 conexões para eletrodos, espaçadas a cada três metros (Figura 13). Os resultados do levantamento de dados da ERT foram processados no PROSYS (ISIS 2005) e exportados para o software RES2DINV (GEOTOMO 2022) para modelagem e interpretação.

4.7 Medição dos parâmetros físico-químicos e amostragem de água

Os parâmetros físico-químicos da água subterrânea e da água do rio Negro medidos foram: potencial hidrogeniônico (pH), temperatura (temp.), condutividade elétrica (CE) e potencial de oxirredução (ORP ou Eh) com a utilização da sonda multiparâmetro YSI (Figura 14A) e um pHmetro de bolso pHep HANNA (Figura 14B). As medições nas águas subterrâneas foram realizadas durante o bombeamento do piezômetro até que os parâmetros permanecessem estáveis por cinco minutos, indicando que a água era representativa do aquífero e que a amostragem da água poderia ser feita. A leitura dos parâmetros na água do rio Negro ocorre com a inserção da sonda no rio no sentido oposto ao fluxo de água, incluindo também aproximadamente 40 cm do fio da sonda. Neste caso, a estabilização dos parâmetros também é aguardada.

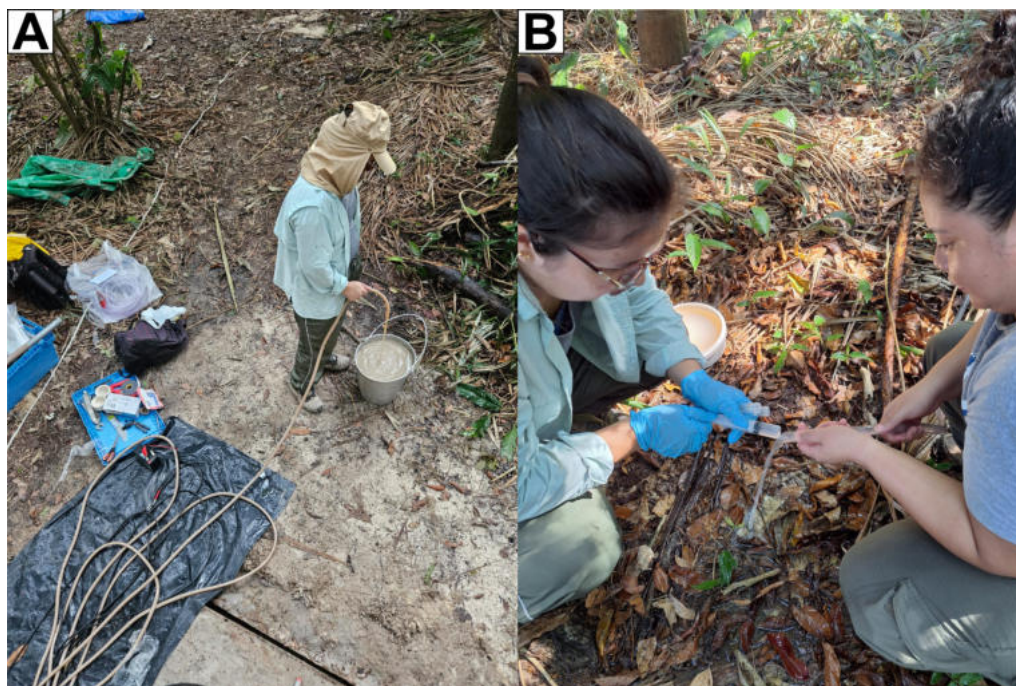
Figura 14 – Imagens da leitura dos parâmetros físico-químicos nas águas subterrâneas e superficiais. A - Leitura dos parâmetros na água do rio Negro. B - Dados de pH e temperatura registrados pelo pHmetro HANNA.



Ao longo deste trabalho, foram realizadas três amostragens de água subterrânea e água superficial do rio Negro, que ocorreram em julho de 2024, e em abril e outubro de 2025. A amostragem de água subterrânea foi feita após o desenvolvimento dos piezômetros, com a extração de três vezes o volume de coluna d'água, que é calculado em campo com informações do nível d'água estático (NE) e informações do raio do piezômetro, e após a estabilização dos parâmetros físico-químicos (Figura 15A). A água do rio Negro foi amostrada no traslado de barco entre a ilha e a margem direita.

A coleta da água foi realizada com a utilização de luvas, seringa previamente lavada com água destilada e ambientada com água a ser amostrada (Figura 15B). As amostras foram armazenadas em frascos de vidro âmbar destinados à análise isotópica, frascos Falcon para análise de sílica, cátions e ânions maiores, e em polipropileno, para teste de alcalinidade.

Figura 15 – Processos executados para a coleta de água subterrânea. A - Desenvolvimento dos piezômetros . B – Coleta de água subterrânea.



4.8 Análise hidroquímica

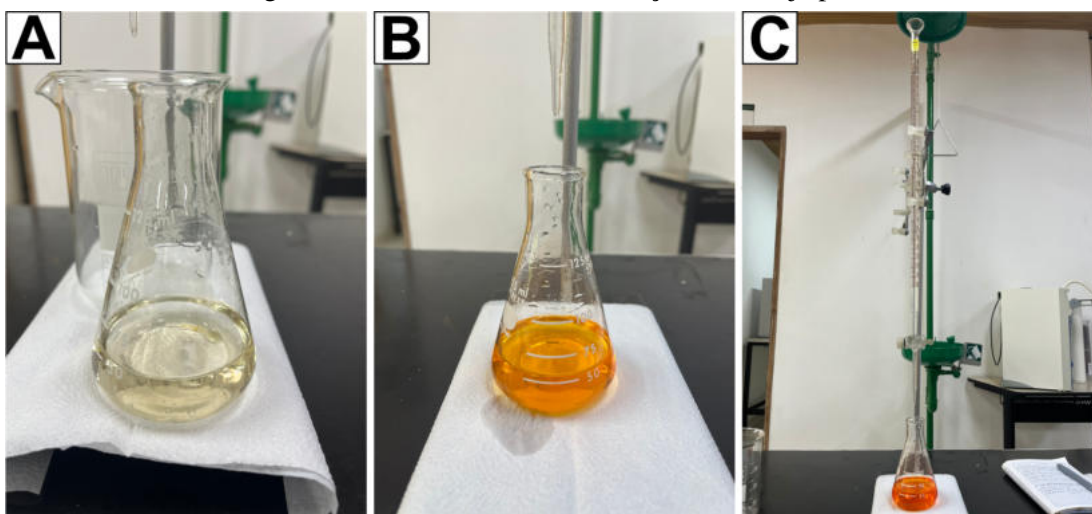
4.8.1 Alcalinidade

A determinação da alcalinidade foi realizada em um período inferior a 24 horas após a coleta de água, evitando a alteração do pH ao entrar em contato com o ar atmosférico. O método aplicado foi o da titulação com indicador ácido-base laranja de metila ($C_{15}H_{15}N_3O_2$), que muda de um tom alaranjado para vermelho ao ter o pH reduzido de 6.2 para 4.4. A titulação foi feita através da adição de 2 a 3 gotas do indicador em 50 mL de amostra, seguida da inserção lenta de ácido clorídrico (HCl) a 0,01 M, com uma bureta graduada, até que a cor do indicador mudasse por completo (Figura 16A, 16B e 16C).

Com as informações do volume de ácido adicionado, a molaridade do ácido, a massa molar do elemento em que a alcalinidade é expressa e o volume da amostra, a alcalinidade da amostra foi calculada aplicando a Equação (24).

$$[\text{Alcalinidade}] = \frac{(\text{Volume ácido} \times \text{Molaridade do ácido} \times 50 \times 1000)}{\text{Volume amostra}} \quad (24)$$

Figura 16 – Teste de alcalinidade. A – Erlenmeyer com 25 ml de água coletada. B – Erlenmeyer contendo água coletada com as gotas do alaranjado de metila. C – Bureta graduada com HCl que gradualmente muda a cor da solução de laranja para vermelho.



4.8.2 Cátions e Ânions maiores

As análises químicas de cátions e ânions maiores das amostras de água subterrânea e do rio Negro foram realizadas no Laboratório do Instituto de Pesquisas da Amazônia – INPA, onde a quantificação dos cátions Na, K, Ca e Mg foi determinada pelo Espectrofotômetro de Absorção Atômica com Chama (EAA-Flame) da marca Perkin Elmer, modelo 1100B.

Para águas filtradas, os íons cloreto, nitrato e nitrogênio total foram determinados pelo espectrofotômetro Shimadzu Ultra Violeta, com auxílio do sistema Flow Injection Analysis (FIA), American Public Health Association (2022).

4.9 Análise isotópica

A análise dos isótopos de ^{18}O e ^2H das amostras de água foi realizada no Laboratório de Isótopos Ambientais - LIA do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS da Universidade de São Paulo - USP, através da técnica de Espectroscopia de Absorção a Laser no equipamento PICARRO.

5 RESULTADOS

5.1 Artigo Submetido: *Hydrogeological Dynamics in Anavilhanas (AM) in Response to the Seasonality of the Negro River and to Extreme Events in 2023 and 2024*

Figura 17 – Dados de submissão do artigo científico à revista *Hydrogeology Journal*

Hydrogeology Journal
Hydrogeological Dynamics in Anavilhanas (AM) in Response to the Seasonality of the Negro River and to Extreme Events in 2023 and 2024
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:		
Full Title:	Hydrogeological Dynamics in Anavilhanas (AM) in Response to the Seasonality of the Negro River and to Extreme Events in 2023 and 2024	
Article Type:	Paper	
Funding Information:	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (01.02.016301.04190/2023-72, call 001/2023 - Universal FAPEAM 20 Anos)	Dr. Ingo Daniel Wahnfried
	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (421966/2023-8, call Universal CNPq 2023 No. 10/2023 for Emerging Research Groups, Tier A)	Dr. Ingo Daniel Wahnfried
	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (01.02.016301.01068/2023-44, call FAP/CNPq No. 003/2022)	Dr. Ingo Daniel Wahnfried
Abstract:	Using stratigraphy, piezometer levels in Anavilhanas Island and right margin of the Negro River, Novo Airão, as well river stage, and precipitation data, this study assessed rain-river-aquifer interactions over 15 months (July 2024–October 2025), with the first year affected by El Niño-driven drought. Resistivity sections were conducted to evaluate spatial variations in the wetting front and water table on the island. Stratigraphically, the island comprises 5 m of mudstones, overlain by fine sand down to 24 m and, below, by medium to coarse sands to 32 m. The 24 m contact marks the transition between island deposits and Negro River bed sediments, which overlie the Alter do Chão Formation, whose last was not reached during drilling. This set forms an aquifer system with flow systems: a shallow one, controlled by local island and river margin topography; an intermediate one, that follows the sediments at the base of the islands and the river channel in an NW-SE direction; and a deep one, in the Alter do Chão Aquifer, with and W-E direction. From mid-September 2024 to the beginning of January 2025, the shallow groundwater flow in the island gets enough rain recharge to generate baseflow to the Negro River and the river becomes influent during the rest of the monitoring period. The intermediate hydraulic head remained lower than the Negro River, keeping the river influent. Precipitation recharge was 11% (2022), 24% (2023), and 8% (2025), with no recharge in 2024, reflecting reduced rainfall, accumulated water deficit, and decreasing unsaturated zone storage.	
Corresponding Author:	Thainá Ferreira de Souza Universidade Federal do Amazonas Manaus, Amazonas BRAZIL	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universidade Federal do Amazonas	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Thainá Ferreira de Souza	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Thainá Ferreira de Souza Alderlene Pimentel de Brito Ingo Daniel Wahnfried	

Hydrogeological Dynamics in Anavilhanas (AM) in Response to the Seasonality of the Negro River and to Extreme Events in 2023 and 2024

Thainá Ferreira de Souza^{1*}, Alderlene Pimentel de Brito^{1†},
Ingo Daniel Wahnfried^{1†}, Thayna Maria Ribeiro de Souza^{1†},
Jamille Dehaini^{2†}, Sávio José Figueiras Ferreira^{2†}

^{1*}Graduate Program in Geosciences, Federal University of Amazonas, Av. Gen.
Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I, Manaus, 69077-000, Amazonas, Brazil.

²Meteorology Coordination of the School of Technology, State University of
Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez de Novembro, Manaus, 69050-020,
Amazonas, Brazil.

³Environmental Chemistry Laboratory, National Institute for Amazonian Research,
Av. André Araújo, 2936, Petrópolis, Manaus, 69067-375, Amazonas, Brazil.

*Corresponding author(s). E-mail(s): thaina.souza@ufam.edu.br;
Contributing authors: alderlene.brito@ufam.edu.br; iwahnfried@ufam.edu.br;
thayna.souza@ufam.edu.br; jdehaini@uea.edu.br; saviojfferreira@gmail.com);

[†]These authors contributed equally to this work.

Abstract

Using stratigraphy, piezometer levels in Anavilhanas Island and right margin of the Negro River, Novo Airão, as well river stage, and precipitation data, this study assessed rain–river–aquifer interactions over 15 months (July 2024–October 2025), with the first year affected by El Niño–driven drought. Resistivity sections were conducted to evaluate spatial variations in the wetting front and water table on the island. Stratigraphically, the island comprises 5 m of mudstones, overlain by fine sand down to 24 m and, below, by medium to coarse sands to 32 m. The 24 m contact marks the transition between island deposits and Negro River bed sediments, which overlie the Alter do Chão Formation, whose last was not reached during drilling. This set forms an aquifer system with flow systems: a shallow one, controlled by local island and river margin topography; an intermediate one, that follows the sediments at the base of the islands and the river channel in an NW-SE direction; and a deep one, in the Alter do Chão Aquifer, with and W-E direction. From mid-September 2024 to the beginning of January 2025, the shallow groundwater flow in the island gets enough rain recharge to generate baseflow to the Negro River and the river becomes influent during the rest of the monitoring period. The intermediate hydraulic head remained lower than the Negro River, keeping the river influent. Precipitation recharge was 11% (2022), 24% (2023), and 8% (2025), with no recharge in 2024, reflecting reduced rainfall, accumulated water deficit, and decreasing unsaturated zone storage.

Keywords: Groundwater–surface water interaction; Hydraulic tests; Aquifer recharge; Geophysical methods

1 Introduction

Water resources are essential for the balance of ecosystems and for meeting society's water demands (Ntona et al. 2022). Aquifers provide one third of the drinking water for the global population (IAH 2025). In addition, they contribute to the maintenance of aquatic ecosystems by supplying baseflows that support the stability of watercourses and the preservation of habitats, especially in areas where surface sources are seasonal or insufficient to meet the growing demand (Virgílio et al. 2021; IGRAC 2025). As components of the hydrological cycle, groundwater and surface water constitute a single resource and therefore must be managed as integrated, interrelated parts (Sophocleous 2002; Silva 2007; Johnstone et al. 2021). Understanding the complex interactions between these components can provide fundamental information to guide the planning and sustainable management of water resources (Teng et al. 2018; Ntona et al. 2022).

The Negro River is the sixth largest river in the world in terms of discharge and the second largest tributary of the Amazon River (Latrubesse and Franzinelli 2005). With a drainage area of 712,000 km^2 and an average discharge of 30,000 m^3/s , this river accounts for 12% of the total surface area of the Amazon Basin (Marinho 2019). Despite this significant availability of surface water resources, 3.88 million people in the Amazon region are supplied exclusively by groundwater sources (ANA 2021). In this context, the Alter do Chão Aquifer (AAC) is the most important reservoir for the Eastern Amazon Region, since it is used for a large share of the water supply to major cities such as Manaus and Santarém, as well as to several smaller municipalities and villages (Aguiar and Mourão 2012; Pita et al. 2018). Many hydrogeological studies are focused on the AAC, but only in or close to the largest cities (Silva and Silva 2007; Aguiar and Mourão 2012; Carvalho and Tomasella 2013; Girard et al. 2023; Ribeiro et al. 2024; Brito et al. 2025). The few studies conducted outside major urban centers are concentrated north of Manaus or are carried out at regional scales, such as Souza et al. (2013), ANA (2015), Rosário et al. (2016), Brito et al. (2020), and Brito et al. (2021).

Over the past three decades, the Amazon has experienced extreme droughts associated with climate variability, with events that are increasingly intense and frequent, such as those that occurred in 2005, 2010, 2015–2016, and 2023–2024 (Erfanian et al. 2017; Brito et al. 2022). The growing frequency and intensity of these extreme events have profoundly transformed the daily lives of riverine communities, undermining mobility, access to essential services such as health and education, and intensifying food and water insecurity (Lima et al. 2024; Santos et al. 2025). In 2023 and 2024, the state of Amazonas was among the three states most affected by drought, impacting 598,000 people (CEMADEN 2023).

The objective of this study was to investigate the relationship between groundwater, rainfall, and the Negro River to understand how these are affected by extreme drought events caused by El Niño, in a region located within the Anavilhanas National Park (PNA).

2 Site description

The study area is located in the municipality of Novo Airão, 195 km from Manaus, the capital of the state of Amazonas. It is inserted within the geological context of the Amazon Sedimentary Basin, with rocks of the Nhamundá Formation, which include neritic sandstones and glaciogenic deposits belonging to the Trombetas Group (Ordovician–Devonian Sequence) (Soares et al. 2005). Rocks of the Alter do Chão Formation of the Javari Group (Mesozoic–Cenozoic Megasequence) also occur, represented by feldspathic/kaolinitic sandstones, quartz arenites, and conglomerates with cross, trough, and tabular stratifications, which have been interpreted as fluvial channel deposits with subordinate facies of siltstones, shales, and mudstones related to a lacustrine environment (Caputo 1984; Cunha et al. 2007). In addition, Quaternary alluvial deposits are distributed along the Negro River (Barbosa 2015).

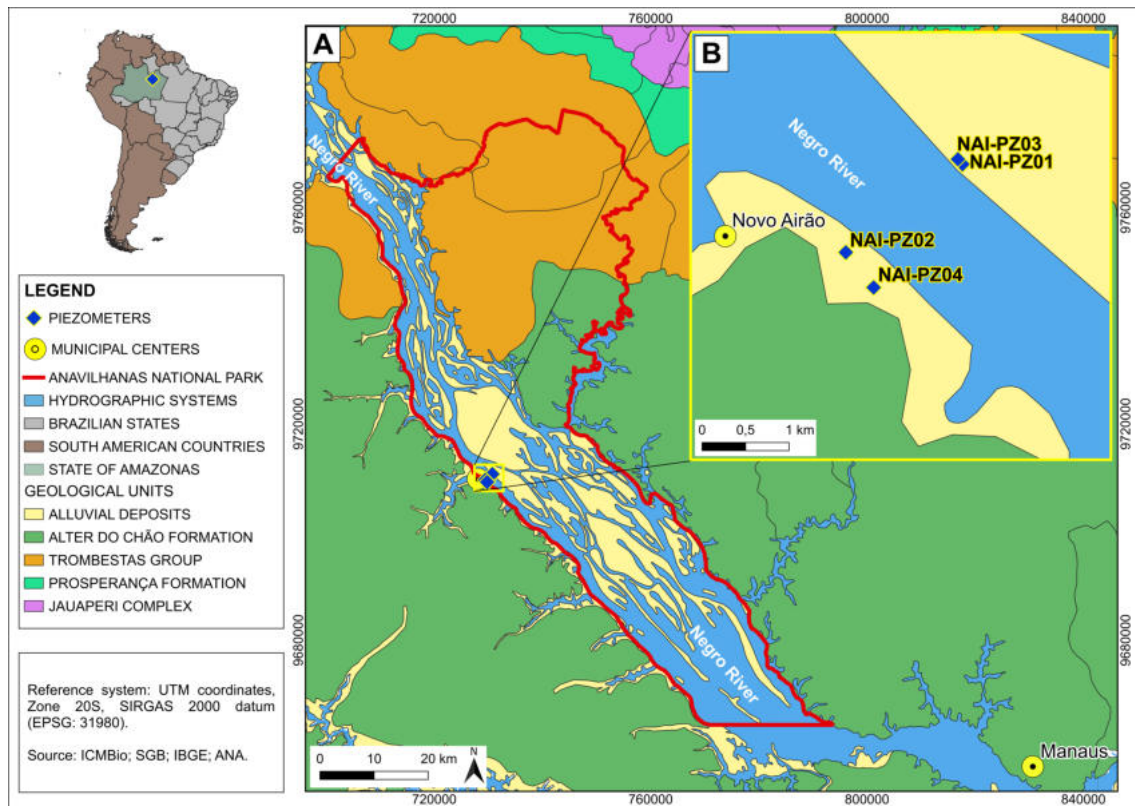


Fig. 1 A - Geological map of the Anavilhanas National Park (PNA) region. B - Location of the piezometers.

The Anavilhanas Archipelago is the second largest river archipelago in the world with approximately 400 islands and 60 lakes in addition to numerous paranás and holes (Alves 2013; Cunha 2017; Queiroz et al. 2024). In the Anavilhanas region, the Alter do Chão Formation (ACF) outcrops in upland areas (“terra firme”), forming escarpments up to 30 m high along stretches eroded by the Negro River. The ACF is composed of intensely oxidized sandstones, with red and yellowish coloration, sometimes whitish. The sandy facies presents medium- to coarse-grained sediments, sometimes silicified and friable. It also displays sets about 1 m thick with trough cross-bedding and planar-parallel stratification, in addition to the occurrence of conglomeratic levels (Barbosa 2015). This formation hosts the Alter do Chão Aquifer System, the main groundwater reservoir of the Amazon Basin (ANA 2015).

Bezerra (2003) describes Quaternary deposits in the middle Negro River region, north of Anavilhanas, comprising fluvial alluvium composed of unconsolidated sand, silt, and clay, as well as interfluvial sandy covers with unconsolidated white and yellowish quartz sands of fine to coarse grain size, in addition to alluvium in Holocene terraces, comprising unconsolidated sands, silts, clays, and gravels. As reported by Irion et al. (2010), high sea levels during the Middle Pleistocene and Late Pleistocene occurred in the deposition of fine-grained fluvial sediments in the newly formed valley. According to Soares et al. (2017), the unconsolidated sediments of the Negro River Valley are approximately 30 m thick and consist of interbedded sand and mud (silt and clay), possibly assigned to the Late Pleistocene–Holocene. These deposits are overlain by a very thin unit (estimated between 10 and 30 cm), which establishes an irregular and erosive contact with the underlying substrate, composed of pelitic interbeds (siltstones and mudstones) and layers of red and whitish sandstones of Neogene age, possibly associated with fluvial deposits from the upper portion of the Alter do Chão Formation

The Anavilhanas islands are described by Franzinelli and Igreja (2002) as a series of islands composed of yellowish-gray clay and silt, and, more rarely, finely laminated fine sand stained red. Cunha (2017) classifies three facies for these Holocene islands: organic-rich mud (basal facies), sandy sediments (intermediate facies), and oxidized mud (upper facies).

According to Franzinelli and Igreja (2002), the Negro River in the Anavilhanas Archipelago sector comprises two distinct structural domains that control its physiography: a domain of normal faults located on the left margin and a domain of dextral faults on the right margin. The normal-fault domain maintains and directs the flow of the main tributaries (NE–SW) from east to west, and of smaller tributaries oriented NW–SE toward the southwest as well as toward the southeast. The dextral-fault domain consists of N45W dextral strike-slip faults and secondary faults arranged in

en echelon in the N70E direction, promoting predominantly west-to-east fluvial flow. According to [Latrubesse and Franzinelli \(2005\)](#), the valley on the right side is mainly controlled by a continuous northwest-trending fault. These two domains were modified by a third, more recent set of dextral strike-slip faults with a general west-east orientation, resulting in a transtensional basin in the southern part of the region, where the channels of the Negro and Solimões rivers are restricted.

The regional climate is classified as Af in the Köppen scale (tropical rainforest) ([ICMBio 2017](#)). The precipitation regime and cloud cover are influenced by the displacement of Atlantic-origin air masses associated with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and by the amount of evaporated water added to moisture advected from the Atlantic Ocean. At the Novo Airão weather station, in the central Anavilhanas region, between 1983 and 2022 (40 years), the average precipitation was 2108 mm/year, with the highest volumes between January and May and the lowest between July and September ([Queiroz et al. 2024](#)).

The Negro River flood period occurs between December and June, with peak water levels typically occurring in June ([Moura et al. 2019](#)). In August and September, the river level drops rapidly, with its minimum occurring between October and November. The average seasonal water level amplitude of the Negro River in the Archipelago is 9.6 m, generating a change in the area of the Anavilhanas lakes of about 10% ([Silva et al. 2020](#)).

Among the aquifers that stand out in the Hydrogeological Province are the Alter do Chão Aquifer and the Alluvial Aquifer ([ANA 2015](#)). The Alter do Chão Aquifer occurs in north-central Pará, eastern Amazonas, and the extreme south of Amapá, covering approximately 290 500 km^2 in its unconfined and outcropping portion, and a total of 552 155 km^2 when areas underlying other formations are also considered ([ANA 2015](#)). It is classified as unconfined near the surface but also occurs under semiconfined and confined conditions ([Pita et al. 2018](#); [Girard et al. 2023](#)). In the city of Manaus, the AAC has a saturated thickness averaging 160 m, and its main hydrodynamic parameters include average transmissivity values of 4.7 m^2/h ; hydraulic conductivity of 2.9×10^{-2} m/h; groundwater gradient on the order of 0.002; and flow velocity around 2 cm/day ([Aguiar and Mourão 2012](#)). Also in Manaus, [Girard et al. \(2023\)](#) found an effective porosity of 9.9%.

In the Amazon, alluvial aquifers are formed by alluvial sediments distributed along river-valley floodplains, with lateral extensions ranging from a few meters to tens of kilometers ([ANA 2015](#)). [Costa \(1986\)](#), in attempting to characterize alluvial aquifers, suggests that alluvial deposits should be analyzed in an integrated manner with surface- and groundwater-drainage levels. However, alluvial aquifers are inherently complex due to varied depositional environments. Therefore, developing a reliable groundwater model to represent an alluvial aquifer is not trivial ([Yin et al. 2021](#)).

3 Materials and Methods

3.1 Particle size analysis and determination of hydraulic conductivity

For the present work, three simple piezometers were manually drilled with an auger and one multi-level piezometer was drilled using rotary drilling with mud circulation. In both methods, sediment samples were collected every meter or at each lithological change. In the first method, samples are collected in the mud circulation channel, which may reduce the presence of pelitic sediments. In manual drilling with an auger, however, there is no such bias. The sediments were analyzed by sieving (sandy fractions) and by pipette analysis (pelitic fractions) at the Sedimentology Laboratory and the Laboratory of Analysis and Treatment of Sediments and Soils (LATOSSOLO) of the Federal University of Amazonas (UFAM), following the method of [Almeida et al. \(2012\)](#). Representative grain-size distribution curves were generated for samples collected from the screened sections of each piezometer. After that, the method of [Shepherd \(1989\)](#) was applied to determine hydraulic conductivity (K) values.

Hydraulic conductivity was also determined through slug and bail tests, using pressure transducers from HOBO brand with a measurement range of 0 to 9 m of water column and the method of [Hvorslev \(1951\)](#).

3.2 Groundwater and surface water level monitoring

Automatic water level measurements were executed with Hobo brand pressure transducers with 9 m of water column of range, registering data in 15 minutes intervals. Manual measurements were also obtained, as described on Table 1. Two piezometers (NAI-PZ02 and NAI-PZ04) are located on the right margin of the Negro River, 1.2 km downstream from the port of Novo Airão. The multilevel piezometer NAI-PZ01 and the simple depth piezometer NAI-PZ03 are located across the 1.3 km wide westernmost channel of the Negro River, on an island of the Anavilhanas Archipelago (Table 1). The Negro River level data were measured at the staff gauge station n. 14900050 of the National Water Agency (ANA), located in Novo Airão (UTM Coordinates: 20S 729437 E 9709667 N), provided by the Geological Survey of Brazil for this study. A topographic survey was carried out in Anavilhanas, using a Brunton compass with clinometer and tape measure, combined with information on the construction of the piezometers and water level data to determine the water level elevations in the piezometers and in the Negro River.

The correlation between groundwater and surface water was established using minimum stage of the Negro River recorded on 4 and 5 November 2025 as an arbitrary datum. This means that any negative groundwater elevation values are below the minimum Negro River for the period.

Table 1 Monitoring information of the piezometers

Piezometer	UTM Coordinates	Depth (m)	Dates of automatic measurements	Dates of manual measurements
NAI-PZ01-14 m	20 S 730524 E 9710459 N	14	27 July–18 October 2024	4 May 2024; 27 July 2024;
NAI-PZ01-30 m		30	27 July–18 October 2024 and 18 October 2024–11 April 2025	18 October 2024; 11–12 April 2025; 3 October 2025
NAI-PZ02	20 S 729442 E 9709655 N	7	27 July–18 October 2024	28 July 2024
NAI-PZ03	20 S 730522 E 9710468 N	7	no data	12 April 2025; 3 October 2025
NAI-PZ04	20 S 729761 E 9709253 N	4	13 April–3 October 2025	26 April 2025

Water-level variation rates were calculated in mm/day, (Final level - Initial level)/number of days, as well as the relationship between daily groundwater and surface-water variations (GW/SW), considering different time periods defined according to the objective of the analysis.

3.3 Water balance

Groundwater recharge was estimated using Water Balance method of [Thorntwaite and Mather \(1955\)](#) adapted by [Brito et al. \(2021\)](#) for the Amazon climate and vegetation for the years 2022 to 2025 (Equation 1).

$$P = SR + AET + \Delta ST + R \quad (1)$$

Where: R = aquifer recharge (mm); P = precipitation (mm); SR = surface runoff (mm); AET = actual evapotranspiration (mm); ΔST = variation in water storage in the unsaturated zone (mm).

Precipitation data from the Novo Airão rainfall station no. 260006 (UTM Coordinates: 20S 728170 E 9710222 N) were used. The Geological Survey of Brazil (SGB) provided data for 2025, while data from 2022 to 2024 are available from the National Hydrometeorological Network (RHN) (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>), coordinated by the National Water Agency (ANA) in partnership with other federal institutions, such as SGB. Temperature data obtained from the NASA POWER Data platform (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) were also used, considering the UTM coordinates 20S 730584 E 9710384 N. The meteorological information provided by this platform is derived from the GMAO MERRA-2 atmospheric assimilation model developed by NASA.

3.4 Electrical resistivity sections

To investigate the lateral continuity of the stratigraphy, identify the dispersion of wetting fronts, and determine the depth of the water table under two conditions: low Negro River stage during

the dry season and high Negro River stage during the rainy season, two surveys were conducted on 27 July 2024 and 11 April 2025, respectively. The method used for geophysical data acquisition at the NAI-PZ01 site was electrical resistivity, applying the Electrical Resistivity Tomography (ERT) technique. For the measurements, a SYSCAL KID SWITCH-24 multi-electrode resistivity imaging system (IRIS Instruments) was used, consisting of two cables with twelve electrode connections each, arranged with three-meter spacing. The ERT survey results were processed in PROSYS (ISIS 2005) and exported to RES2DINV (GEOTOMO 2022) for modeling and interpretation.

4 Results

4.1 Sedimentological Characterization of the Study Area

Grain-size analysis of the sediments revealed sedimentological differences between Anavilhanas and the right margin of the Negro River (Figure 2).

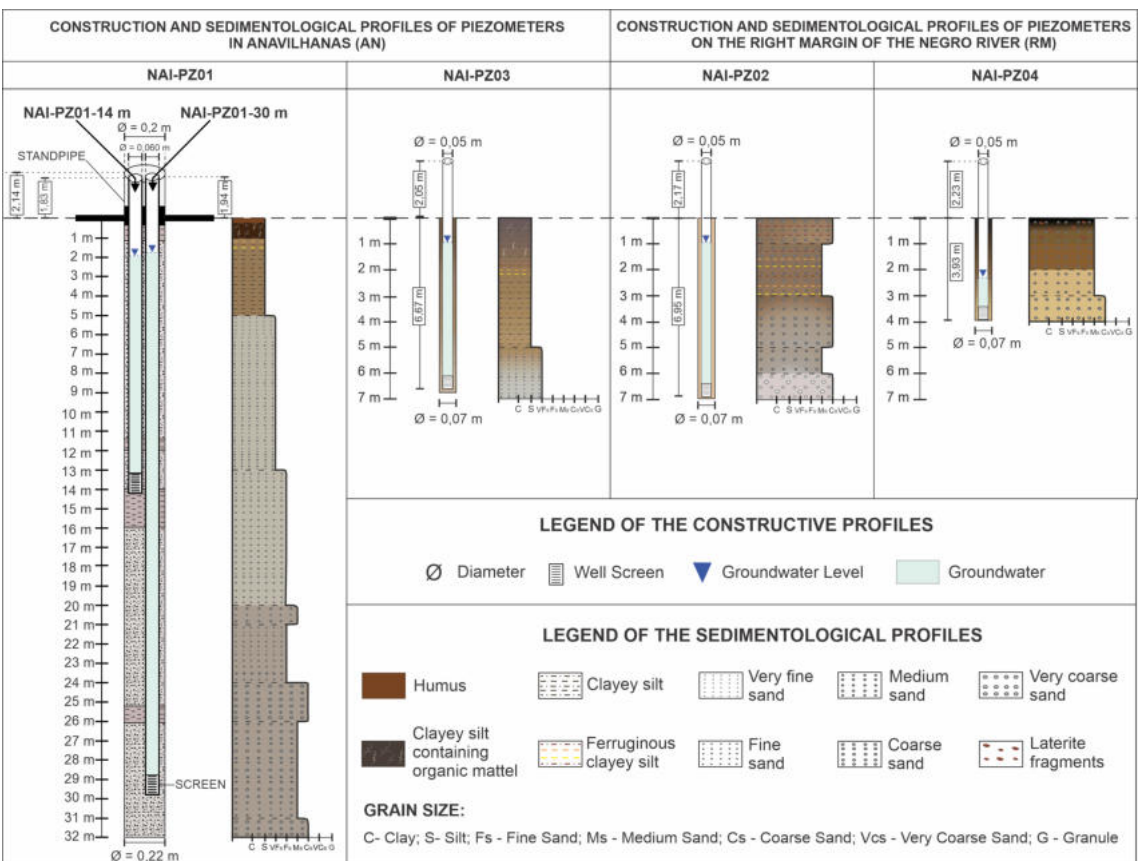


Fig. 2 Constructive and stratigraphic information of the piezometers.

The sedimentary sequence on Anavilhanas Island (AN) reveals an upward decrease in granulometry, suggesting a fining sequence in which grain size progressively decreases from the base to

the top of the layers. In profile AN-PZ01, the basal section (24–32 m) shows a predominance of sandy sediments ranging from medium to coarse sand, followed by fine- to medium-sand sediments (19–24 m). Above this interval (13–20 m), fine sand predominates, and in the upper portion (6–13 m), very fine sand occurs. In the five meters closest to the surface, silty-clayey sediments with ferruginous portions predominate. The sediment composition in Anavilhanas initially contains 8 to 34% sand fraction (0–5 m), grading to 54 to 90% in the intermediate portion (6–20 m) and 92 to 98% at greater depths (20–32 m), whereas clay and silt fractions initially comprise 66 to 92% of the sedimentological composition, decreasing to 25 to 46% and finally dropping to a maximum of 24% clay and silt.

The NAI-PZ03 (AN) profile shows the same characteristics as the shallow section of NAI-PZ01, with predominance of ferruginous silty-clayey sediments in the first five meters, with composition varying between 76 and 90% of this material. At depth, there is an increase in the proportion of very fine sand (6–7 m), with 80 to 82% sandy fraction.

The piezometer NAI-PZ02, located on the right margin of the Negro River (RM), shows a subtle upward fining trend, with shallower to intermediate portions (0–5 m) consisting of sandy to sandy-silty-clayey sediments, with sand contents ranging from 71 to 60% and ferruginous clayey and silty material around 29 to 40%. At greater depths (6–8 m), clay and silt compose between 13 and 18% of the sediments, while sand accounts for 82 to 87%. The sand found at depth differs from the shallower portion by its “washed sand” appearance, indicative of alluvial deposits from the Negro River bed.

The NAI-PZ04 (RM) profile initially shows a downward fining trend (0–1 m), with the top composed of 65% sand fraction decreasing to 51% at the base, while clay and silt increase from 34% at the top to 49% at the base. Down to the final depth reached (1–4 m), the trend becomes upward fining, with the sand fraction increasing from 55 to 62% with depth and the silty and clayey fractions decreasing from 45 to 37%. The presence of lateritic crust fragments within the first three meters and abundant clay-silt composition are characteristic of a colluvial deposit overlying the Alter do Chão Formation.

4.2 Relationship between groundwater level (GWL), surface water level (SWL), and precipitation

Figure 3 relates the automatic and manual measurements of groundwater level (GWL) in piezometers NAI-PZ01 (14 m and 30 m) with precipitation and Negro River stage (SWL) data from 27 July 2024 to 10 October 2025.

From 27 July to 5 November 2024, during the period of decreased water levels in the Negro River, SWL gradually decreased, then rose, and later decreased again until reaching the annual minimum stage of 3 m on 4 and 5 November, a behavior called "repique", which are unpredictable and temporary reversals in river level that may occur during both rising and falling stages (Valenzuela et al. 2023; Coomes et al. 2016). During the dry season, in August and September, the lowest precipitation volumes of the year occur, 13 and 48 mm respectively, with 11 (16–26 August 2024) and 30 (28 August–26 September 2024) consecutive days without rainfall. During the first 30 days of August, the Negro River showed a greater and progressive decrease of 150 mm/day, while piezometers NAI-PZ01-14 m and NAI-PZ01-30 m showed rates of 135 and 146 mm/day, and groundwater–surface water level ratios (GWL/SWL) of 0.90 and 0.97, respectively. As GWL declined, the transducers became exposed above the water level, interrupting automatic recording at the end of August. This loss of the automatic measurement data was later filled with level estimates represented by dashed lines using both manual measurements and the observed relationship with the Negro River level (Figure 3).

To verify the level changes at a smaller temporal scale, as well as the influence of rainless days, water-level variations during these 30 days were analyzed at five-day intervals, since this time window presented the same number of consecutive days with and without rainfall. During the first five days, when rainfall occurred on only two days, SWL decreased by 70 mm/day, while GWL in both piezometers decreased by 68 mm/day (GWL/SWL = 0.97). In the following five days without rainfall, SWL decreased at a rate of 92 mm/day, while GWL in the piezometers decreased 86 mm/day (GWL/SWL = 0.93). In another five-day period, again with rainfall on only two days, the Negro River decreased by 98 mm/day and the piezometers by 100 mm/day (GW/SW = 1.02). After 11 days without precipitation, the Negro River decreased by 173 mm/day, and GWL in NAI-PZ01-14 m decreased by 158 mm/day, while in NAI-PZ01-30 m it decreased by 171 mm/day (GWL/SWL = 0.92 and 0.98, respectively). During rainy days, the average rate was 84 mm/day for both the Negro River and the piezometers. During days without rainfall, the average rate was 133 mm/day for the Negro River and 122 and 129 mm/day for piezometers NAI-PZ01-14 m and NAI-PZ01-30 m.

Monitoring during the dry season was resumed on October 18, with a manual measurement and the beginning of GWL monitoring using transducers. Automatic recording by the transducers continued, however, data from NAI-PZ01-14 m were unavailable due to technical problems with the transducer.

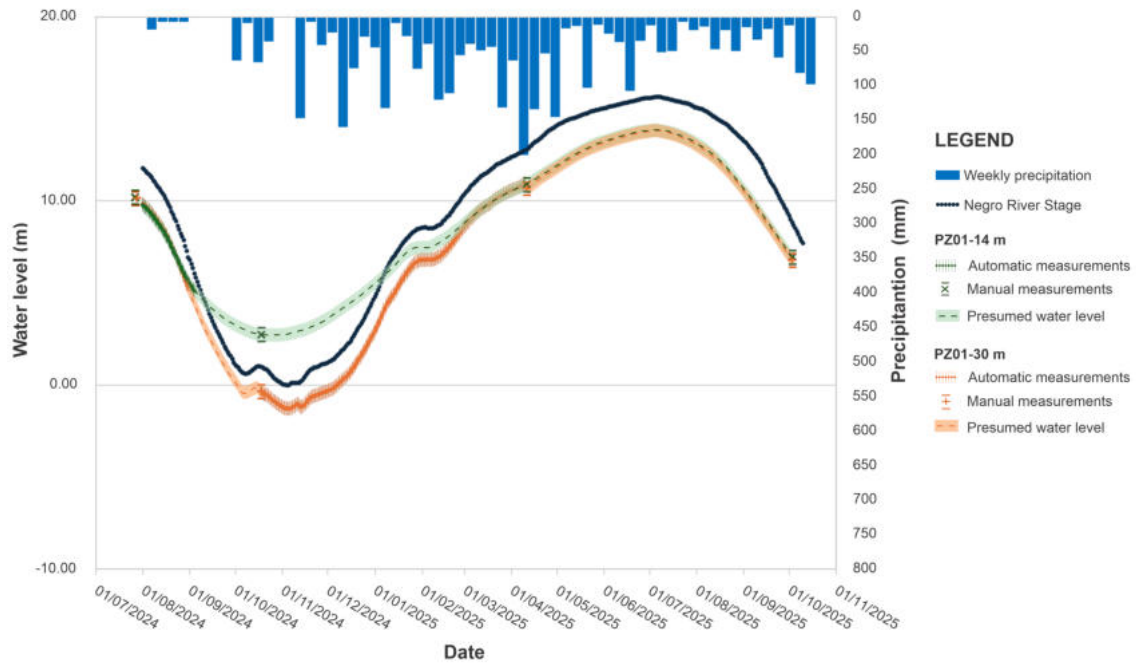


Fig. 3 Variation in groundwater level (m) in Anavilhanas (AN) and in the Negro River and in precipitation volume (mm) during the period from August 2024 to October 2025.

Near the end of the dry period, the decrease in GWL became greater than the decrease in SWL. During five days, with rainfall occurring on only three days, SWL continued to decrease by 34 mm/day, while GWL decreased by 38 mm/day (GWL/SWL ratio = 1.12). After 14 consecutive days without rainfall, until the day when both the Negro River and groundwater reached their minimum levels on November 4 and 5, SWL decreased by 53 mm/day and GWL by 59 mm/day (GWL/SWL ratio = 1.11). Shortly after the river and the water table at 30 m reached their minimum values, SWL began to rise but then remained stable for four days, while GWL continued to rise progressively. When SWL resumed rising, a drop in GWL was observed for three days, after which it rose again together with SWL.

Subsequently, the increase in surface-water and groundwater levels followed the intensification of daily rainfall volumes, although still with considerable intervals of seven and then nine consecutive days without precipitation until early December. During these two rainless periods, SWL rose by 68 and 33 mm/day, respectively, while GWL rose by 28 and 29 mm/day. From January to April 2025, the maximum number of consecutive days without rainfall decreased to two and three days, while rainfall volumes gradually increased. Over successive 30-day periods, total rainfall amounts were 215, 180, 319, and 328 mm. During this same interval, SWL showed higher rising rates than GWL, averaging 89 mm/day, while GWL averaged 87 mm/day. In the last eight days of monitoring, SWL rose by 35 mm/day and GWL by 9 mm/day. The second "repiquete" occurred on February 3, when

the Negro River reached the highest level recorded up to that point, decreased over the following four days, and then resumed rising. During the drop in river level, GWL remained constant and subsequently rose again in synchrony with the Negro River.

During this period of well-distributed rainfall, the rise in GWL was continuous, without episodic responses associated with isolated precipitation events. In piezometer NAI-PZ01-14 m, despite being shallow, no direct relationship was observed between individual rainfall events and water-level variations. In NAI-PZ01-30 m, this lack of correlation is explained by the greater depth, which attenuates the arrival of the wetting front.

In April, manual measurements were carried out in the Anavilhanas piezometers, indicating downward flow, with groundwater levels of 1.48 m at NAI-PZ03, 1.51 m at NAI-PZ01-14 m, and 1.69 m at NAI-PZ01-30 m. This record was followed by the loss of the automatic measurement data caused by the theft of the transducers, resulting in the gap observed in the graph, which also was later filled with level estimates represented by dashed lines in Figure 3

4.3 Hydraulic parameters

4.3.1 Hydraulic conductivity (K)

The results of the grain-size analysis processed using the method of [Shepherd \(1989\)](#) and the results obtained from the interpretation of slug tests using the method of [Hvorslev \(1951\)](#) are shown in Table 2.

Table 2 Hydraulic conductivity values (K) in m/s

Piezometer	Hvorslev (1951)	Shepherd (1989)
NAI-PZ01-14 m	2.8×10^{-5}	4.8×10^{-5}
NAI-PZ01-30 m	3.7×10^{-8}	3.6×10^{-4}
NAI-PZ02	1.3×10^{-6}	4.5×10^{-4}
NAI-PZ03	¹	5.6×10^{-5}
NAI-PZ04	2.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}

¹No hydraulic test was performed.

Following the method of [Hvorslev \(1951\)](#), the alluvial aquifer showed a higher hydraulic conductivity (K) of 2.8×10^{-5} m/s for the screened interval located at 14 m depth and (3.7×10^{-8}) m/s at 30 m. The sedimentological characteristics at the screened interval at 14 m comprise 79.9% sandy sediments, ranging from very fine to fine sand, and 20.1% silty-clayey sediments, whereas the interval at 30 m consists of 97.6% sand, ranging from medium to coarse sand, and 2.5% silty and clayey sediments.

The K values obtained for the right margin of the Negro River were 1.3×10^{-6} m/s for NAI-PZ02 and 2.0×10^{-6} m/s for the colluvial environment at NAI-PZ04, with screened intervals at seven and four meters, respectively. In NAI-PZ02, the screen is located where 87.0% of the sediments are sandy, with medium to coarse sand size, and 13.0% clayey-silty sediments. In comparison, NAI-PZ04 presents 62.1% sandy sediments, predominantly medium to coarse sand, but with 37.9% of its composition consisting of clayey-silty sediments.

The values obtained using the method of [Shepherd \(1989\)](#) allowed the estimation of hydraulic conductivity (K) strictly correlated with sedimentological characteristics. NAI-PZ01 (14 m) and NAI-PZ03 showed lower conductivity values due to the greater presence of silty and clayey sediments, with only a small difference within the expected range (4.8×10^{-5} and 5.6×10^{-5} m/s). NAI-PZ01 (30 m), NAI-PZ04, and NAI-PZ02 showed the highest conductivity values (3.6×10^{-4} , 4.5×10^{-4} , and 1.2×10^{-4} m/s) because of their sandier characteristics, with NAI-PZ04 containing more clayey sediments than NAI-PZ02.

The NAI-PZ01-14 m showed good agreement between the two methods used to determine hydraulic conductivity. However, the results for NAI-PZ01-30 m were discrepant, with values obtained from the slug test significantly lower than those estimated from grain-size analysis. Since no divergence between methods occurred in NAI-PZ01-14 m, this discrepancy cannot be attributed to sampling bias caused by the removal of fine sediments during rotary drilling. The most plausible explanation is the presence of fine sediments in the annular space, resulting from the collapse of overlying strata or from the re-opening of the borehole during drilling. Therefore, the K value obtained from the slug test was adopted for NAI-PZ01-14 m, and the value obtained from grain-size analysis was adopted for NAI-PZ01-30 m.

4.3.2 Groundwater flow velocity

Topographic relationships were determined near NAI-PZ01 through field measurements using a Brunton compass with clinometer and a measuring tape, allowing the determination of slope angles and horizontal and vertical distances between the piezometers and the Negro River water level on 18 October 2024, which was used as a reference to establish the hydraulic gradient on other dates based on water-level measurements necessary for calculating the hydraulic gradient (i). The hydraulic gradients and hydraulic conductivity for piezometers PZ01-14 m and 30 m were then used to determine the Darcy velocity.

The hydraulic head in the piezometers was 2.13 m (NAI-PZ01-14 m) and 5.12 m (NAI-PZ01-30 m) above the Negro River. Considering a distance of 42.4 m on 18.10.24, the date of the topographic

survey, hydraulic gradients of -0.050 and -0.121 were obtained. Based on the hydraulic conductivities of 2.8×10^{-5} m/s and 3.6×10^{-4} m/s, the Darcy velocities were estimated at 1.4×10^{-6} m/s and 4.4×10^{-5} m/s for the 14 m and 30 m tubes of NAI-PZ01.

4.4 Water Balance

Table 3 presents the monthly and annual values of precipitation (P), actual evapotranspiration (AET), surface runoff (SR), water storage in the unsaturated zone (ST), and recharge (R), expressed in mm and as a percentage of precipitation.

Table 3 Climatological water balance for the years 2022, 2023, 2024 and 2025, considering the components: precipitation (P), actual evapotranspiration (AET), surface runoff (SR), unsaturated zone storage (ST), water deficit (WD) and aquifer recharge (R).

M	2022							2023						
	P	AET	SR	ST	WD	R	R	P	AET	SR	ST	WD	R	R
	(mm)						(%)	(mm)						(%)
Jan	115	145	25	264	25	0	0	365	142	80	320	0	65	18
Feb	340	143	75	320	0	66	19	374	146	82	320	0	146	39
Mar	227	146	50	320	0	31	14	409	146	90	320	0	173	42
Apr	352	147	77	320	0	127	36	350	148	77	320	0	124	36
May	205	143	45	320	0	17	9	148	146	32	289	31	0	0
Jun	204	141	45	320	0	17	8	89	132	20	227	4	0	0
Jul	62	135	11	236	-2	0	0	123	137	22	191	3	0	0
Aug	74	118	13	178	-19	0	0	30	30	5	121	-71	0	0
Sep	36	88	7	120	-62	0	0	19	11	3	73	-112	0	0
Oct	123	119	22	102	-13	0	0	9	38	2	42	-141	0	0
Nov	138	125	25	90	-3	0	0	79	65	14	30	-85	0	0
Dec	389	150	86	243	0	0	0	149	120	33	26	-7	0	0
T	2263	1600	481	2833	-73	259	11	2142	1390	461	2278	-377	508	24

M	2024							2025						
	P	AET	SR	ST	WD	R	R	P	AET	SR	ST	WD	R	R
	(mm)						(%)	(mm)						(%)
Jan	163	130	36	24	0	0	0	222	153	49	122	0	0	0
Feb	256	158	56	66	0	0	0	298	153	65	201	0	0	0
Mar	320	156	70	160	0	0	0	292	153	64	276	0	0	0
Apr	345	154	76	275	0	0	0	507	150	112	320	0	201	40
May	266	153	58	320	0	9	3	120	146	26	267	21	0	0
Jun	76	140	17	239	4	0	0	183	146	40	261	0	0	0
Jul	68	119	12	176	-23	0	0	101	135	18	210	-1	0	0
Aug	13	78	2	108	-85	0	0	105	132	19	164	-14	0	0
Sep	48	77	9	70	-92	0	0	105	125	19	125	-29	0	0
Oct	100	101	18	51	-63	0	0	204	168	37	123	0	0	0
Nov	192	160	34	49	0	0	0	190	161	34	118	0	0	0
Dec	281	166	62	101	0	0	0	243	137	44	180	0	0	0
T	2127	1592	451	1639	-258	9	0	2570	1763	528	2365	-23	201	8

Annual precipitation varied throughout the analyzed period, with values of 2263, 2142, 2127, and 2570 mm. Actual evapotranspiration followed the variability of precipitation over the months but remained relatively high in all years, with annual totals ranging between 1390 and 1763 mm. The volume associated with surface runoff also showed a direct relationship with precipitation occurrence, varying between 451 and 528 mm per year. The highest storage value was recorded in

2022, followed by a gradual reduction in 2023 and 2024, and recovery in 2025. The lowest water deficits (-377 and -258 mm) occurred in 2023 and 2024, respectively; in 2024, the deficit exceeded recharge.

The highest monthly recharge values were concentrated during the rainiest period of the year, generally between January and April (Figure 4). In 2022, total recharge reached 259 mm, corresponding to 11% of total precipitation. In 2023, annual recharge was higher than in the previous year, totaling 508 mm (24% of total precipitation), although accompanied by the largest recorded water deficit (-377 mm).

In 2024, the year with the lowest precipitation, with values very close to or below the climatological average (1983 – 2025) (Figure 4), total recharge decreased to 9 mm. In 2025, recharge intensified again, particularly in April, the rainiest month of the last four years (507 mm) and the only month in which recharge corresponded to 8% of total precipitation.

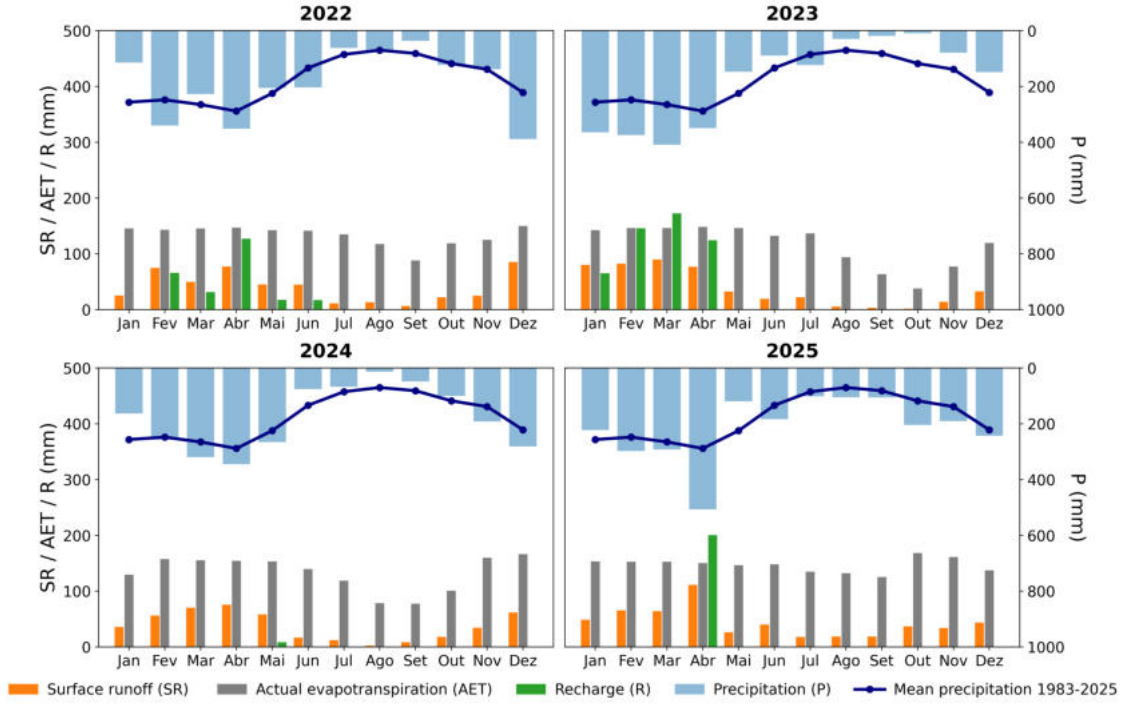


Fig. 4 Monthly water balance for the years 2022 to 2025, showing precipitation (blue bars), mean monthly precipitation (P), surface runoff (SR), actual evapotranspiration (AET), and groundwater recharge (R). The mean monthly precipitation was calculated based on the historical series from 1983 to 2025. Values are expressed in millimeters (mm).

4.5 Resistivity

The resistivity sections were carried out next to NAI-PZ01, in Anavilhanas (Figure 5). Section A was acquired in July 2024, during a period of 15 consecutive days without rainfall. Sections B and C were conducted in April 2025, during a period of 22 consecutive days of precipitation (248 mm).

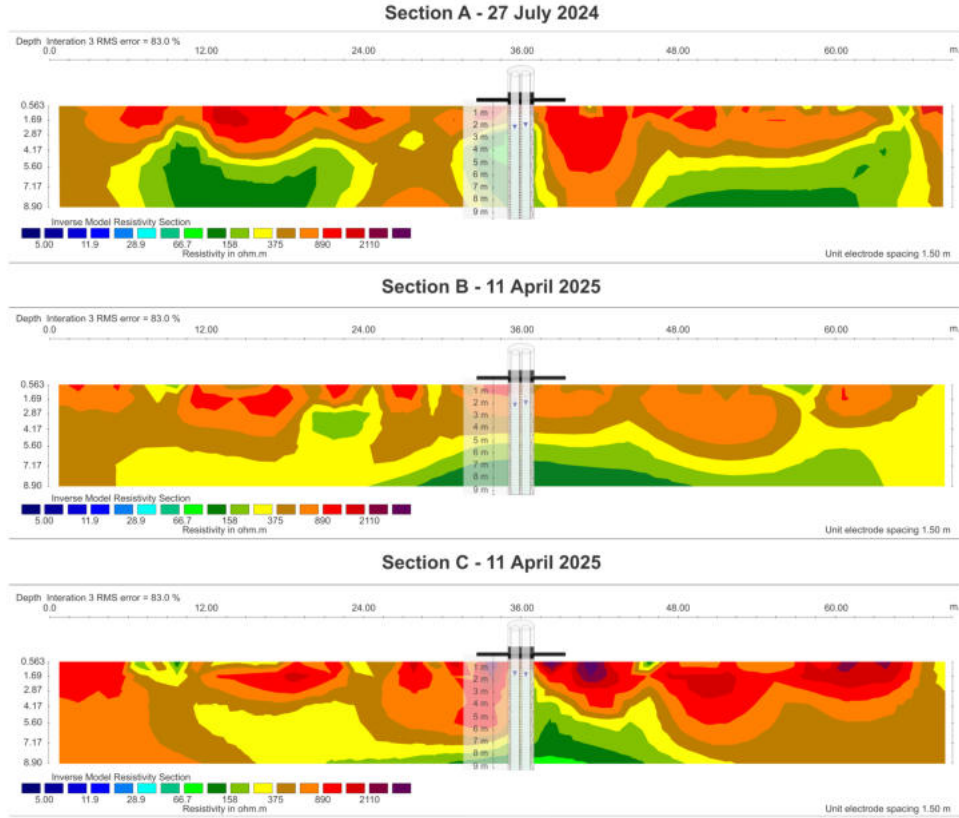


Fig. 5 Inverse electrical resistivity sections obtained through electrical profiling (Electrical Resistivity Tomography — ERT) carried out in the Anavilhanas Archipelago. (a) Section A measured on July 27, 2024; (b) Section B measured on April 11, 2025; and (c) Section C measured on April 11, 2025. The color scale represents electrical resistivity values (ohm.m), and depth is estimated from the inverse model.

The shallow portion of section A (0–2 m) predominantly presents medium to high resistivity values (890 ohm.m) in the orange and red areas, suggesting a predominantly dry surface layer with low water saturation. Isolated points of low to medium resistivity (158 to 375 ohm.m), shown in yellow and green, indicate zones of higher moisture and infiltration, suggesting the existence of preferential vertical water-flow pathways in the unsaturated zone. In the intermediate portion of the section, starting at a depth of 4.17 m, zones of lower resistivity appear in green (66.7 to 158 ohm.m), indicating groundwater-saturated zones or saturated and conductive clayey strata.

The section B shows a reduction in resistivity values, indicating greater moisture content or a rise in the water table in April 2025. At the surface (0–2 m), less resistive zones indicate higher

moisture, most likely due to rainfall or the proximity of flooded areas, which are common during the Negro River high-water season. The shallow portion also shows more infiltration points in green, representing locations with low resistivity values. At intermediate depths (4.17–5.60 m), medium resistivity values (375 ohm.m) appear continuously, marking this interval as a transitional zone separating less saturated shallow areas from more saturated portions at depth (7.17 to 8.90 m).

The section C shows greater lateral heterogeneity and the presence of deeper conductive zones concentrated in the center of the section. In the shallowest portion, zones with very high resistivity values (2110 ohm.m) reflect less saturated soils.

5 Discussions

The sedimentological characteristics in Anavilhanas consist of five meters of silty-clayey layers followed by sandy strata with an upward fining trend and coarser grains at the base, showing similarity to some profiles described by Cunha (2017). On the island, subsurface iron oxide concentrations were much subtler, and the organic-matter-rich facies described by the author as massive dark gray mud was not found, possibly due to variability in layer thickness also reported by the author. On the right margin, NAI-PZ02 presented clayey-sandy sediments at the surface and sandy sediments at depth, reaching the sandy deposits of the Negro River bed, whereas NAI-PZ04, which is shallower, reached only the colluvium that overlies the Alter do Chão Formation.

The different methods applied to determine hydraulic conductivity (K) showed better agreement with finer sedimentological strata. The values obtained for the shallow section on Anavilhanas Island, both at NAI-PZ01-14 m and NAI-PZ03, were within the same order of magnitude (10^{-5} m/s). In the coarser strata, granulometric methods indicated higher conductivities (10^{-4} m/s) than those obtained through hydraulic tests (10^{-6} m/s) at NAI-PZ02 and NAI-PZ04. For NAI-PZ01-30 m in Anavilhanas, the observed contrast is greater and suggests possible influence of piezometer construction problems associated with granulometric segregation resulting from filling the annular space with sediments from the formation itself.

The Figure 6 shows a conceptual model that integrates the local sedimentological characteristics and the GWL/SWL relationship during the 2024 dry season and the 2025 flood period. Data obtained from an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), WorkHorse Rio Grande model, 600 kHz, were also used to better characterize the geometry of the Negro River bed. The instrument was used to acquire velocity measurements along a cross-section perpendicular to the Negro River axis between piezometers NAI-PZ01 and NAI-PZ02 in October 2024.

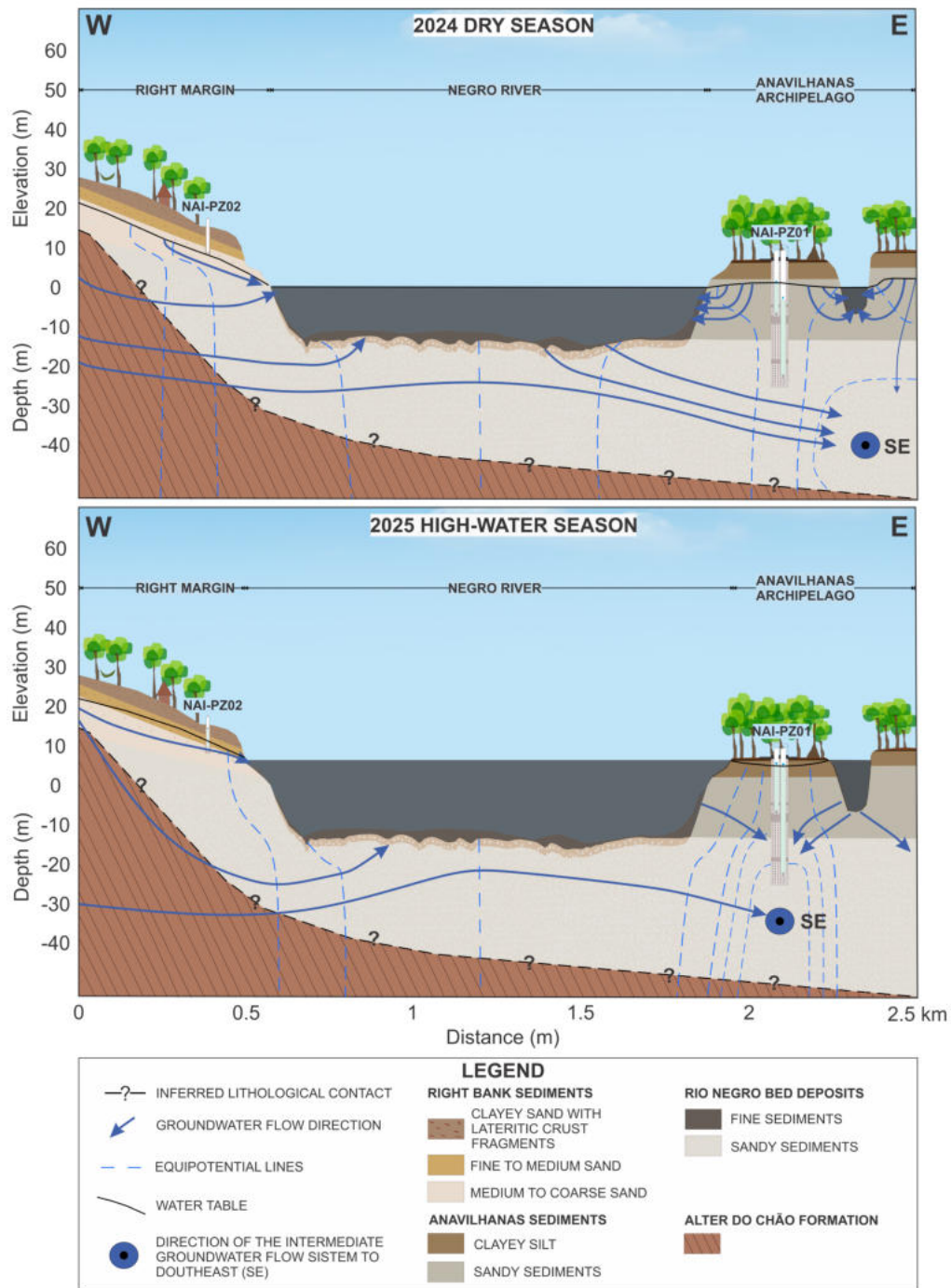


Fig. 6 Conceptual model of the aquifer on an island of the Anavilhanas Archipelago during the 2024 dry season and the 2025 flood.

Analysis of this relationship allowed groundwater flow to be characterized for most of the monitoring period. In the shallow part of the aquifer located in the fine sediments of the Anavilhanas Island, as downward and occasionally as no-flow during dry periods. The Negro River showed predominantly influent behavior, with continuous water loss to the intermediate aquifer, located below 24 m depth at the base of the island. Closer to the right margin of the Negro this might

not occur, due to probable upward flow from the deep Alter do Chão Aquifer, as this aquifer has regional recharge from higher elevation (terra firme) areas, but we don't have local data yet to confirm this. In this central portion, effluent aquifer flow occurs only from the shallow zone, observed in the flow reversal at NAI-PZ01-14 m, which remained above the Negro River level from mid September 2024 to January 2025, coinciding with the end of the dry period and the beginning of the rising stage. Therefore, the Negro River, at the area of the island where NAI-PZ01 is located, contributed throughout the monitored period to regional flow associated with the Alter do Chão Aquifer, and there were no periods in which regional groundwater flow contributed to the baseflow of the Negro River, as observed from the water level data measured from the piezometer at 30 m, which remained below the river level and followed river-level variations and repiquete events. Surface water entering approximately perpendicular to the riverbed likely turn toward the SE, running paralell to the Negro within the sandy sediments deposited in the riverbed and along its margins. This groundwater flow represents an intermediate path between the local flow associated with the topography of the margins and of the Anavilhanas islands, and the regional flow characteristic of the Alter do Chão Aquifer, which is shown by (ANA 2015) and (Rosário et al. 2016) to flow from W to E.

Most of the precipitation was allocated to actual evapotranspiration and surface runoff, leaving only a small fraction available for groundwater recharge, which was concentrated in the months of highest precipitation. This recharge amounts to 11% and 24% of the total precipitation in 2022 and 2023, respectively. It was negligible in 2024 and corresponded to 8% in 2025. The water balance data suggest that the decrease in recharge is not solely related to the reduction in total precipitation observed in 2023 and 2024, but also to the gradual decrease in storage within the unsaturated zone over time and the accumulation of water deficit, reflecting the reduction in cumulative rainfall that has been evident since 2022. The reduction in recharge during these atypically dry periods explain the absence of significant increases in the deeper water table during the dry season, which can be better observed in shallower piezometers. The resistivity sections show that this recharge occurs in a localized and heterogeneous manner, later migrating to deeper portions where it becomes more uniformly distributed. This might also reduce total recharge, but this effect needs to be tested using other methods.

6 Conclusion

The present study provides a preliminary hydrogeological conceptual model for the aquifer system present up to a depth of 32 m in the Anavilhanas Archipelago. This model consists of a stratigraphic

cross section, composed from top to bottom by clay to fine sands that form the island down to 24 m, medium to coarse sands deposited at the base of Negro River Channel, and the Alter do Chão formation. Water level monitoring indicates that there are three groundwater flow systems acting at different scales in the area: 1) a shallow flow controlled by local topography, both in the island and the right margin of the Negro, that from mid september 2024 to beginning of january 2025 was effluent, and during the rest of the monitoring period was influent; 2) an intermediate flow system that received water both from the local groundwater flow and from the Negro during the whole monitored period, and goes through the coarser sands of the base of the Negro, in a NW-SE direction; and 3) the regional flow in the Alter do Chão Aquifer that, based on literature, flows from W to E. The hydraulic relation with the Alter do Chão was not directly monitored, and can be both influent and effluent for the Negro.

This relationship contrasts with what is typically expected in Amazonian settings and highlights the sensitivity to climatic variability associated with events such as El Niño, which also influenced the reduction in recharge, linked not only to decreased rainfall totals but also to the progressive accumulation of water deficit and the reduction of storage in the unsaturated zone.

Recharge was concentrated in the rainiest months of the year and occurs heterogeneously through preferential pathways of vertical water flow in the unsaturated zone. In 2022, recharge corresponded to 11% of the total precipitation, and in 2023 it increased to 24%, accompanied by the highest recorded water deficit (-377 mm), followed by the second highest deficit in 2024 (-258 mm), which resulted in an annual recharge of 9 mm, a nearly null recharge from precipitation. The year 2025 shows more intense rainfall and an increase in recharge to 8% of the total precipitation.

This study reinforces the importance of hydrogeological data collection throughout the Amazon Basin and its sub-basins, considering their distinct regional characteristics. It further emphasizes the importance of continuous maintenance of hydrometeorological stations, enabling studies such as this one, especially in municipalities far from major urban centers, which are more vulnerable to the intensification of extreme floods and droughts observed in recent years. Despite the challenges related to access, river seasonality, and equipment security, the continued monitoring of local groundwater and surface-water systems is essential for understanding the role of shallow unconfined aquifers in the resilience of ecosystem services in the Amazon Basin. The absence of such information affects the quality of hydrological and climate modeling, resulting in significant data gaps in the development of future scenarios for the region.

Acknowledgements. We are deeply grateful to the Amazonas State Research Support Foundation (FAPEAM) and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq),

which funded the fieldwork. We thank the staff of the laboratories at the Federal University of Amazonas (UFAM): the Geochemistry Laboratory, the Spectroscopic Methods Laboratory (LAMESP), the Sedimentology Laboratory, and the Laboratory for Sediment and Soil Analysis and Treatment (LATOSSOLO), as well as the laboratories of the National Institute of Amazonian Research (INPA) and the Environmental Isotope Laboratory (LIA) of the Groundwater Research Center (CEPAS) at the University of São Paulo (USP). We also express our gratitude to the Chico Mendes Institute for Biodiversity Conservation (ICMBio) for granting permission to work in PNA and to the Geological Survey of Brazil (SGB) for providing essential data for the development of this study. The authors also thank the Fluvius Anavilhanas Course, funded by IRD and operated by the Universidade Federal do Amazonas and by Géosciences Environment Toulouse (GET).

Funding. This work was financially supported by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) through call 001/2023 — Universal FAPEAM 20 Anos (award number 01.02.016301.04190/2023-72), by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), through call Universal CNPq 2023 No. 10/2023 for Emerging Research Groups, Tier A (award nr. 421966/2023-8), and by both agencies in the combined call FAP/CNPq No. 003/2022 (award nr. 01.02.016301.01068/2023-44).

Conflict of interest/Competing interests. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

Ethics approval and consent to participate. Not applicable.

Consent for publication. Not applicable.

Data availability. Not applicable.

Materials availability. Not applicable.

Code availability . Not applicable.

Author contribution. Thainá Ferreira de Souza: Investigation, Visualization, Analysis, Writing — original draft. Alderlene Pimentel de Brito: Supervision, Writing — review. Ingo Daniel Wahnfried: Supervision, Funding acquisition, Project administration, Validation, Writing — review and editing. Thayna Maria Ribeiro de Souza: Data collection and analysis. Jamile Dehaini: Data collection and analysis. Sávio José Figueiras Ferreira: Data collection and analysis.

All authors contributed to the planning of the fieldwork and to data interpretation. The final manuscript was reviewed and approved by all authors.

References

- Almeida, B.G.d., Donagemma, G.K., Ruiz, H.A., Braidia, J.A., Viana, J.H.M., Reichert, J.M.M., Oliveira, L.B., Ceddia, M.B., Wadt, P.S., Fernandes, R.B.A., Passos, R.R., Dechen, S.C.F., Klein, V.A., Teixeira, W.G.: Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. Technical report, EMBRAPA (December 2012). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/950832>
- Alves, N.d.S.: Mapeamento hidromorfodinâmico do complexo fluvial de Anavilhanas: contribuição aos estudos de geomorfologia fluvial de rios amazônicos. PhD thesis, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo (2013). <https://doi.org/10.11606/T.8.2013.tde-02082013-130114> . <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-02082013-130114/pt-br.php>
- Aguiar, C.J.B.d., Mourão, M.A.A.: Rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas. Technical report, CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (2012). <http://www.cprm.gov.br/bibliotecavirtual/estantevirtual>
- ANA: Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e cidades pilotos (escala 1:50.000): Volume III – Hidrogeologia e modelo numérico de fluxo da PHA no Brasil. Technical report, Agência Nacional de Águas (2015). https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/07c7cf8f-6e81-4040-b405-8361f6b4cdf9/attachments/Volume.III-Hidrogeologia_e_Modelo_Numerico_de_Fluxo_da_PHA_no_Brasil.pdf
- ANA: ATLAS ÁGUAS SEGURANÇA HÍDRICA DO ABASTECIMENTO URBANO. Technical report, Agência Nacional de Águas (2021). <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>
- Barbosa, R.O.: Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do Arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central). Master's thesis, Universidade Federal do Amazonas (2015). <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5016>
- Bezerra, P.: Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões-Negro. PhD thesis, Universidade Federal do Pará (2003)
- Brito, A.P.d., Leal, A.V.C., Wahnfried, I.D.: Caracterização hidrogeológica da Microbacia Onça na Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus AM. *Igapó* **14**(2) (2020)

- Brito, A.P.d., Manzione, R.L., Wahnfried, I.D.: Groundwater dynamics and hydrogeological processes in the Alter do Chão Aquifer: A case study in Manaus, Amazonas – Brazil. *Groundwater for Sustainable Development* **29**, 101441 (2025) <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2025.101441>
- Brito, A.P.d., Silva, N.C.d., Tomasell, a., Ferreira, S.J.F., Monteiro, M.T.F.: Analysis of the Rain Anomaly Index and Precipitation Trend for Pluviometric Stations in Central Amazonia. *Revista Brasileira de Meteorologia* **37**, 19–30 (2022) <https://doi.org/10.1590/0102-778637014521>
- Brito, A.P.d., Wahnfried, I.D., de, F.S.J.F., Bastos, J.H.B.d.: Comparative analysis of recharge estimation methods for a microbasin in Reserva Florestal Adolpho Ducke, Manaus - AM. *Geologia USP - Serie Cientifica* **21**, 59–73 (2021) <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-154769>
- Caputo, M.V.: Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of brazil. PhD thesis, University of California (1984). <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8961>
- CEMADEN: Monitoramento de secas e impactos no brasil: Boletim - setembro 2023, ano 04, número 64. Technical report, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (September 2023). <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/monitoramento-de-seca-para-o-brasil/monitoramento-de-secas-e-impactos-no-brasil-2013-setembro-2023-1>
- Coomes, O.T., Lapointe, M., Templeton, M., List, G.: Amazon river flow regime and flood recession agriculture: Flood stage reversals and risk of annual crop loss. *Journal of Hydrology* **539**, 214–222 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.027>
- Cunha, P.R.d.C., Melo, J.H.G.d., Silva, O.B.d.: Bacia do amazonas. Technical report, Petrobras (2007). <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/307/230>
- Costa, W.: O Aquífero Aluvial e sua exploração racional. *Águas Subterrâneas* (1986)
- Carvalho, J.d.S., Tomasella, J.: Aspectos morfoestruturais do relevo na região norte da cidade de manaus e suas influências na dinâmica do aquífero alter do chão. *Revista Brasileira de Geomorfologia* **14**, 323–330 (2013) <https://doi.org/10.20502/rbg.v14i3.430>
- Cunha, D.F.d.: Evolução sedimentar do Arquipélago de Anavilhanas no baixo Rio Negro, Amazônia Central. Master's thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (2017). <https://doi.org/10.11606/D.44.2017.tde-24072023-085242> . <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/>

[44/44141/tde-24072023-085242/en.php](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.014)

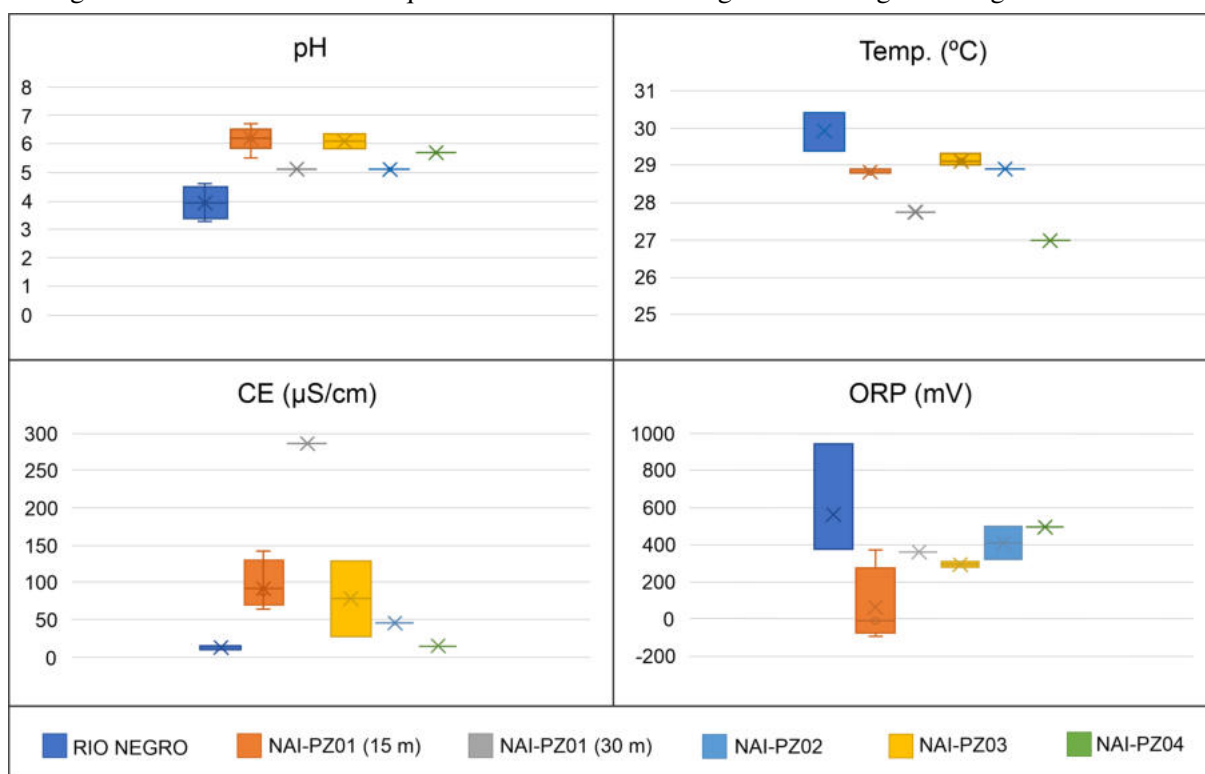
- Erfanian, A., Wang, G., Fomenko, L.: Unprecedented drought over tropical south america in 2016: Significantly under-predicted by tropical sst. *Scientific Reports* **7** (2017) <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05373-2>
- Franzinelli, E., Igreja, H.: Modern sedimentation in the Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. *Geomorphology* **44**, 259–271 (2002) [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00178-7)
- Girard, Y.B.B., Wahnfried, I.D., Trindade, P.H.D.: Testes de bombeamento e traçador para determinar confinamento e parâmetros hidráulicos do aquífero Alter do Chão em Manaus. *Geociências* **42**, 85–95 (2023) <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i01.17389>
- Hvorslev, M.J.: Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations vol. 36. Waterways Experiment Station Corps of Engineers US Army, ??? (1951)
- IAH: Groundwater— more about the hidden resource. (2025). <https://iah.org/education/general-public/groundwater-hidden-resource>
- ICMBio: Plano de Manejo do Parque Nacional de Anavilhanas. Technical report, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2017). https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-de-ucs/parna-de-anavilhanas/arquivos/plano_manejo-parna_de_anavilhanas.pdf
- Irion, G., Mello, J.A., Morais, J., Piedade, M.T., Junk, W.J., Garming, L.: Development of the amazon valley during the middle to late quaternary: sedimentological and climatological observations. In: *Amazonian Floodplain Forests: Ecophysiology, Biodiversity and Sustainable Management*, pp. 27–42. Springer, ??? (2010)
- IGRAC: Groundwater Basics (2025). <https://un-igrac.org/why-groundwater/groundwater-basics/>
- Johnstone, C., Bedaso, Z.K., Ekberg, M.: Characterizing surface water and groundwater interaction for sustainable water resources management in southwestern ohio. *Sustainable Water Resources Management* **8**(10) (2021) <https://doi.org/10.1007/s40899-021-00598-6>
- Latrubesse, E.M., Franzinelli, E.: The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. *Geomorphology* **70**, 372–397 (2005) <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.014>

- Lima, L.S.d., Silva, F.E.O.e., Anastácio, P.R.D., Kolanski, M.M.d.P., Pereira, A.C.P., Menezes, M.S.R., Cunha, E.L.T.P., Macedo, M.N.: Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the Brazilian Amazon. *Communications Earth and Environment* **5** (2024) <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01530-4>
- Marinho, R.R.: Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro - Amazonas, Brasil. PhD thesis, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Universidade do Estado do Amazonas – UEA (December 2019). <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12984>
- Moura, M.M., Santos, A.R.d., Pezzopane, J.E.M., Alexandre, R.S., Silva, S.F.d., Pimentel, S.M., Andrade, M.S.S.d., Silva, F.G.R., Branco, E.R.F., Moreira, T.R., Silva, R.G.d., Carvalho, J.R.d.: Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. *Science of the Total Environment* **651**, 1639–1651 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>
- Ntona, M.M., Busico, G., Mastrocicco, M., Kazakis, N.: Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of the Total Environment* **846** (2022) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>
- Pita, R.C.d.S., Silva Júnior, G.C.d., Rosário, F.F.d., Silva, M.L.d.: Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Geologia USP - Série Científica* **18**, 273–296 (2018) <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-134253>
- Queiroz, M.S.d., Marinho, R.R., Alves, N.d.S., Rodrigues, C.: Arquipélago de Anavilhanas: revisão de estudos geomorfológicos e lacunas conceituais. *Revista Geonorte* **15** (2024) <https://doi.org/10.21170/geonorte.2024.V.15.N.48.166.198>
- Rosário, F.F.d., Custodio, E., Silva, G.C.d.: Hydrogeology of the Western Amazon Aquifer System (WAAS). *Journal of South American Earth Sciences* **72**, 375–386 (2016) <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.10.004>
- Ribeiro, A., Wahnfried, I., Fernandes Neto, L.A.: Levantamento de contaminações geogênicas e antrópicas em águas subterrâneas na cidade de Novo Airão. *Revista Geonorte* **15** (2024) <https://doi.org/10.21170/geonorte.2024.v.15.n.48.99.124>

5.2 Hidroquímica e Isotopia

Com referência aos parâmetros físico-químicos, a água do rio Negro apresentou pH mais ácido, 3.3 a 5.0 no período de vazante a 4.2 no período de enchente ao fim de cheia. Já as amostras subterrâneas apresentaram pH mais elevado, indicando uma menor acidez, com valores entre 5.1 e 6.37 na ilha de Anavilhanas, e 5.1 e 5.7 na margem direita. As temperaturas apresentaram variações sutis entre os corpos hídricos analisados. O rio Negro apresentou temperaturas mais elevadas nos meses de vazante (32.7°C em 2024) em comparação com os períodos de enchente e cheia (29.4 a 30.0°C). As águas subterrâneas mostraram temperaturas ligeiramente mais baixas (27.0 e 29.3°C), o que é comum devido à menor exposição à luz solar direta.

Figura 18 – Parâmetros físico-químicos das amostras de água do rio Negro e de água subterrânea.

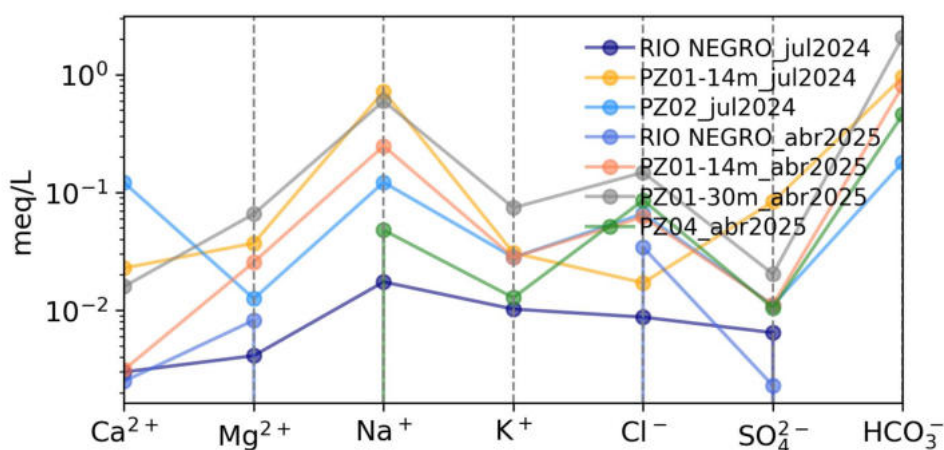


A condutividade elétrica (CE) foi consideravelmente maior nas águas subterrâneas, com destaque para Anavilhanas (90.7 a $286 \mu\text{S}/\text{cm}$), sendo o maior valor pertencente às amostras de 30 m do Aquífero Aluvionar. As águas da margem direita apresentaram CE menor em relação a Anavilhanas, $45 \mu\text{S}/\text{cm}$ para o NAI-PZ02 e $14.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ no NAI-PZ04, este último valor de condutividade apresentou semelhança aos valores das águas do rio Negro durante os períodos de enchente (13.6 e $14.7 \mu\text{S}/\text{cm}$), enquanto na vazante, o rio Negro apresentou condutividade menor ($8.0 - 9.5 \mu\text{S}/\text{cm}$). As águas do rio Negro apresentaram valores de potencial de oxirredução

(ORP) no intervalo de 377 a 936 mV, indicando ambiente mais oxidante. As águas subterrâneas, no geral, também apresentaram valores positivos de ORP, porém, as águas amostradas no piezômetro NAI-PZ01 (14 m) apresentaram valores negativos (-96.6 mV, sugerindo condições redutoras.

Com base nas concentrações dos principais íons dissolvidos, foi elaborado um diagrama de Schoeller, apresentado na Figura 19. A água subterrânea em Anavilhanas mostrou-se mais mineralizada com as amostras de 14 m apresentando maiores concentrações dos cátions Na^+ (5.7 e 16.6 mg/L) e K^+ (1.1 e 1.2 mg/L) e do ânion Cl^- (0.61 a 2.2 mg/L). Também apresentaram concentrações notáveis de SiO_2 (15.7 e 18.92 mg/L) e em algumas amostras, Fe (7.5 mg/L), bem como valores e alcalinidade de 49 e 58 mg equivalente de mg/L $CaCO_3/L$. As amostras de 30 m apresentaram concentrações de Na^+ parecidas (13.70 mg/L), mas K^+ (2.90 mg/L), Cl^- (5.24 mg/L), e Fe (20.19 mg/L) mais elevadas, enquanto a concentração de SiO_2 foi menor (14.6 mg/L) e a alcalinidade maior (127 mg equivalente de mg/L $CaCO_3/L$).

Figura 19 – Diagrama de Schoeller.

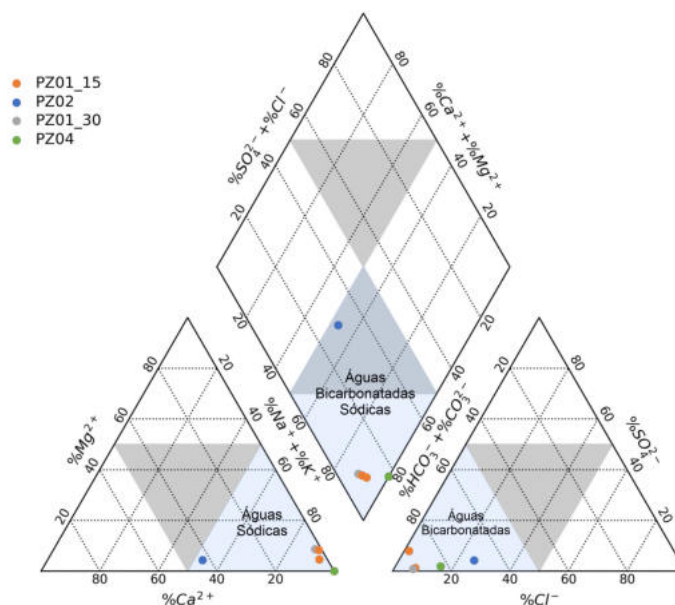


Na margem direita, as amostras de água coletadas no NAI-PZ02 mostraram concentrações elevadas dos íons Na^+ (2.80 mg/L), K^+ (1.10 mg/L), Ca^{2+} (2.43 mg/L), Cl^- (2.34 mg/L) e NO_3^- (5.13 mg/L), sendo estes dois últimos indicativos de alteração. As amostras do NAI-PZ04 apresentaram concentrações menores dos íons Na^+ (1.10 mg/L) e K^+ (0.5 mg/L) e mais elevada de Cl^- (3.04 mg/L). As concentrações de SiO_2 foram iguais (1.6 mg/L), enquanto a alcalinidade no NAI-PZ02 foi de 11 mg equivalente de mg/L $CaCO_3/L$ e no NAI-PZ04, 28 mg equivalente de mg/L $CaCO_3/L$.

O rio Negro apresentou baixas concentrações dos cátions Na^+ e K^+ (0.40 mg/L para ambos) e dos ânions Cl^- e SO_4^{2-} (0.31 mg/L para ambos), com menores valores de sílica

na vazante (1.45 mg/L) e ligeiramente superiores na enchente (1.77 mg/L), mostrando-se um componente mais abundante no período chuvoso.

Figura 20 – Diagrama de Piper.

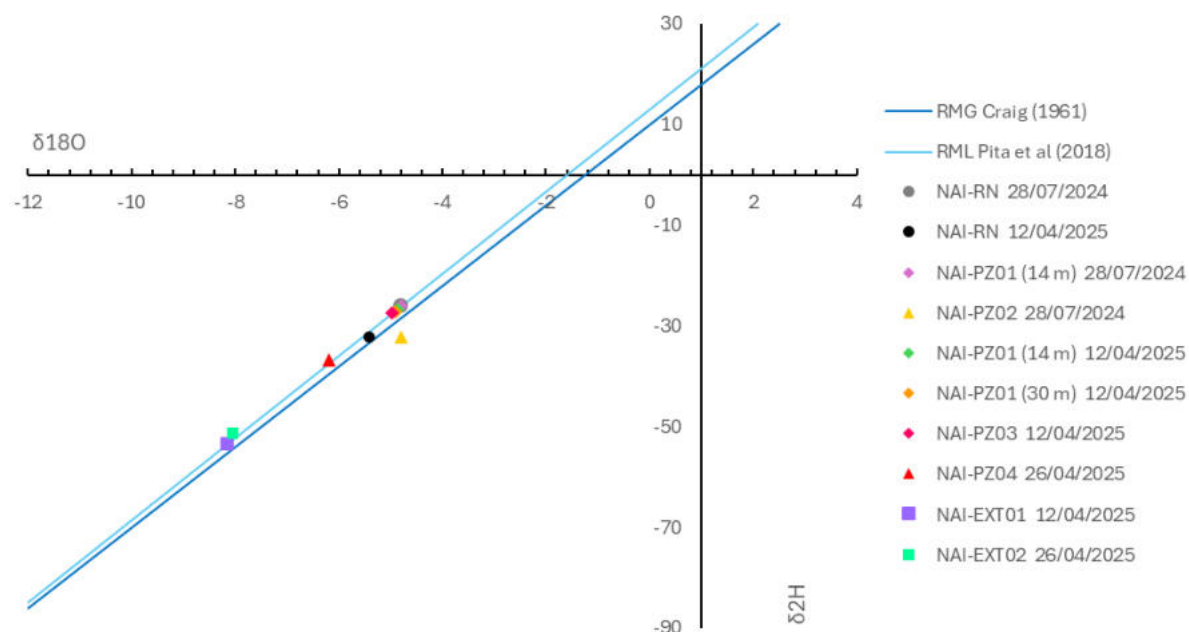


Na elaboração do diagrama de Piper, foram utilizadas apenas as amostras de água subterrânea. Todas as amostras, com predomínio dos íons Na^{2+} e HCO_3^- , plotaram na região correspondente às águas bicarbonatadas sódicas. Para Anavilhanas, a distribuição dos pontos revela baixa dispersão, sugerindo uma composição química relativamente homogênea entre as amostras. Embora as águas da margem direita se apresentem sutilmente distintas, a amostra do NAI-PZ02 com maiores concentrações de cátions em relação ao NAI-PZ04, que por sua vez não apresentou valores para Mg^{2+} e Ca^{2+} , e mostrou maior concentração de Cl^- , de modo geral, apresentaram pouca variação espacial no tipo hidroquímico dessas águas.

A Figura 21 mostra as razões isotópicas $\delta^{18}O$ e δ^2H nas amostras de água subterrânea e do rio Negro. Todas as amostras situam-se próximas à Reta Meteorica Global (Craig, 1961) e à Reta Meteorica Local de Manaus (Pita *et al.*, 2018). A proximidade entre as amostras NAI-PZ01, NAI-PZ03 e do rio Negro (NAI-RN) com as retas sugere origem meteórica. O leve deslocamento observado das amostras do NAI-PZ02 e NAI-PZ04 podem refletir variações isotópicas decorrentes da evaporação superficial.

As águas coletadas nos extratores mostraram uma composição isotópica mais leve. As amostras de água subterrânea da margem direita do rio Negro se diferenciaram das de Anavilhanas, mostrando-se mais empobrecidas, com atenção para a amostra do NAI-PZ02, que se situa longe das retas meteóricas RMG e RML. As amostras de água subterrânea de

Figura 21 – Diagrama δ^2H - $\delta^{18}O$ com a reta meteórica global (Craig, 1961) e com a reta meteórica local (Pita *et al.*, 2018) com as amostras de água do rio Negro e das águas subterrâneas



Anavilhanas apresentaram as mesmas características, plotaram no mesmo campo no gráfico e apresentaram um menor empobrecimento e as amostras do rio Negro plotaram em campos distintos.

6 DISCUSSÕES

O monitoramento das variações de nível das águas subterrâneas, juntamente com dados de cota do rio Negro e da chuva local do município de Novo Airão, possibilitou a observação do comportamento da relação entre as águas superficiais e subterrâneas durante 15 meses (27 de julho de 2024 a 10 de outubro de 2025). O sítio de monitoramento também viabilizou a caracterização sedimentológica, realização de testes hidráulicos e a coleta de amostras de água para análise hidroquímica e isotópica. Os dados de chuva local foram de suma importância não apenas para o monitoramento, mas também para a aplicação do método do balanço hídrico, que viabilizou a quantificação da recarga no aquífero. Seções de resistividade obtidas pelo método do imageamento geoeletrico permitiram a visualização do comportamento da recarga a partir da chuva em subsuperfície.

Do ponto de vista sedimentológico, a ilha de Anavilhanas apresentou cinco metros de uma camada silte-argilosa sobreposta a camadas de areia muito fina e areia fina, que gradualmente se tornam mais grossas até 24 m, a partir de onde predominam areias médias e grossas até a base da sequência analisada, a 32 m. Considera-se que o contato a 24 m marca a transição dos sedimentos que compõem a ilha para os sedimentos depositados no leito do rio Negro. Subjacente a estas formações encontra-se a Formação Alter do Chão (FAC), cujo contato não foi alcançado durante a perfuração. Concentrações de óxido de ferro foram muito sutis, e a fácies rica em matéria orgânica descrita por (Cunha, 2017) como lama maciça cinza-escura não foi encontrada, possivelmente devido à variabilidade na espessura das camadas, também relatada pela autora.

O piezômetro NAI-PZ02 está inserido em camadas silte-argilosas, com poucos indícios de material laterítico na superfície e com material predominantemente arenoso em profundidade, alcançando uma camada arenosa grossa com aspecto de "areia lavada", indicativa de sedimentos que o rio Negro deposita em seu leito e margens. Já o NAI-PZ04 atingiu apenas o colúvio, mostrando sedimentos mais silte-argilosos com fragmentos de crosta laterítica.

Os testes hidráulicos no aquífero aluvionar determinaram um valor médio de condutividade hidráulica (K) de $2.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ para a camada areno-argilosa, respectiva da seção filtrante a 14 m, e um valor de $3.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ resultante de um teste no piezômetro de 30 m. Um único teste realizado no NAI-PZ02 e NAI-PZ04 resultou em valores para a margem direita de 1.3×10^{-6} e $2.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, respectivamente. Os valores de condutividade com ordem de

10^{-5} e 10^{-6} obtidos no NAI-PZ01-14 m e nos piezômetros da margem direita corresponderam a litologias de areia limpa à areia siltosa, enquanto que o NAI-PZ01-30, com ordem de grandeza 10^{-8} m, apresentou equivalência a litologia de silte.

Os testes granulométricos utilizando o método Shepherd (1989) mostraram uma melhor correlação com amostras mais argilosas, com uma condutividade hidráulica de 4.8×10^{-5} m/s, valor muito próximo ao obtido pelo teste hidráulico. Em contrapartida, para camadas mais arenosas da margem direita, mostrou uma correlação mais estreita com maiores valores de 4.5×10^{-4} e 1.2×10^{-4} m/s para os piezômetros NAI-PZ02 e NAI-PZ04. A condutividade de 3.6×10^{-4} m/s obtida para o NAI-PZ01 (30 m) evidenciou um contraste acentuado com o valor obtido no teste hidráulico (3.7×10^{-8} m/s) e, considerando suas características sedimentológicas mais arenosas, esse contraste sugere a presença de sedimentos finos no espaço anelar, resultante do colapso de estratos superiores ou da reabertura necessária do furo durante a perfuração. Os valores de condutividade obtidos por este método, com ordens de 10^{-4} e 10^{-5} , também indicam sedimentologia de areia limpa a areia siltosa.

A análise da relação entre os níveis da água subterrânea e do rio Negro foi estabelecida entre 27 de julho de 2024 e 10 de outubro de 2025. Somente os dados provenientes do piezômetro multinível NAI-PZ01 apresentaram informações suficientes para uma análise de um ciclo hidrológico completo. Os dados de nível da água subterrânea compreenderam dados manuais, automáticos e dados interpretados. Essa interpretação foi necessária para o preenchimento da lacuna de dados deixada por problemas técnicos, bem como pelo furto dos transdutores, e se baseou na relação entre os níveis de água subterrânea e do rio Negro observada com os dados automáticos e manuais, bem como com o levantamento topográfico realizado no dia 18 de outubro. Neste dia, o nível da água subterrânea no piezômetro NAI-PZ01-14 m estava 2.74 m acima da cota do rio Negro, enquanto no piezômetro NAI-PZ01-30 m, -0.35 m abaixo.

O modelo conceitual hidrogeológico em Anavilhanas apresenta sistemas de fluxo local, intermediário e regional. O sistema de fluxo local compreende fluxos nas porções mais rasas do aquífero, situados na topografia das margens imediatamente adjacentes ao rio Negro e às ilhas de Anavilhanas. Durante a estiagem, no período de meados de setembro de 2024 a início de janeiro de 2025, ocorreram fluxos efluentes descendentes em direção ao rio Negro, enquanto no restante do período analisado, as porções mais rasas do aquífero aluvionar recebem contribuição do rio Negro, o que pode não ocorrer na margem direita. O sistema de fluxo intermediário permaneceu com as mesmas características durante a estiagem e durante a cheia, recebendo a contribuição do

rio Negro. A água infiltra de forma perpendicular ao eixo do rio Negro, migrando para sudeste para continuar seguindo de forma paralela ao leito do rio Negro dentro dos sedimentos arenosos dispostos no leito e nas margens do rio, contribuindo a todo momento para o fluxo regional associado ao Aquífero Alter do Chão, que segue de W para E (ANA, 2015; Rosario; Custodio; Silva, 2016). Este último, por sua vez, durante todo o período monitorado, não contribuiu em forma de fluxo de base para o aquífero, uma vez que a carga hidráulica permaneceu abaixo do nível do rio Negro e correspondeu às variações de nível e aos eventos de repiquete. Sugere-se que, durante a cheia, os lagos contribuam para o sistema de fluxo intermediário de forma mais intensa.

O método de estimativa de recarga factível neste estudo foi o balanço hídrico, com a utilização de volumes de precipitação local e dados diários de temperatura obtidos pelo NASA POWER data. No período analisado (2022-2025), as recargas mensais concentraram-se nos meses mais chuvosos, com recarga a partir da precipitação de 11% (2022), 24% (2023) e 8% (2025). Em 2022, o volume de precipitação foi mais elevado e apresentou boa distribuição ao longo do ano. Em 2023, com o início do evento El Niño, observou-se maior recarga, associada aos elevados volumes mensais de chuva concentrados no período chuvoso. Entretanto, o acúmulo progressivo do déficit hídrico e o aumento do armazenamento de água na zona não saturada resultaram, em 2024, na intensificação dos impactos do El Niño, com recarga estimada em apenas 9 mm, correspondente a uma contribuição praticamente nula em relação à precipitação anual. Apenas em 2025, com a elevação dos volumes mensais e do total anual de precipitação, a recarga apresentou aumento. Através das seções de resistividade, foi visto que esta recarga ocorre de maneira pontual e heterogênea, migrando posteriormente para porções mais profundas, onde se torna mais uniformemente distribuída.

Em relação aos demais métodos de estimativa de recarga, os dados de monitoramento automático de todos os piezômetros não mostraram picos de recarga que viabilizassem a aplicação do método do VNA. Já o método de Darcy possibilitou apenas a determinação da velocidade de fluxo de 1.4×10^{-6} m/s e 4.5×10^{-9} m/s para os piezômetros NAI-PZ01-14 m e NAI-PZ01-30 m, uma vez que as variações espaciais diárias entre os dois pontos de cota, água subterrânea e rio Negro não foram quantificáveis. Essa relação foi unicamente estabelecida por meio do levantamento topográfico realizado em outubro de 2024.

Os parâmetros físico-químicos da água do rio Negro apresentaram variação de valores entre os períodos de vazante e enchente, mas de maneira geral, mostraram-se ácidas com

temperaturas mais elevadas, condutividade elétrica baixa e ambiente oxidante. No aquífero aluvionar, as amostras do piezômetro de 14 m se mostraram menos ácidas, com condutividade elétrica elevada e indicaram um ambiente redutor. Já as amostras de 30 m mostraram valores de condutividade muito elevados, bem como maior acidez e ambiente oxidante como o rio Negro. Na margem direita, as águas subterrâneas mostraram as mesmas características, acidez, temperaturas baixas, condutividade baixa e ambiente oxidante.

As amostras da água subterrânea em Anavilhanas mostraram-se mais mineralizadas, sendo a amostra coletada no NAI-PZ01-14 m com concentrações elevadas de Fe (7.5 mg/L), que podem ser correlacionadas com concentrações de óxido de Fe descritas por (Cunha, 2017). Considerações a respeito das amostras de água coletadas no NAI-PZ01-30 m irão apresentar viés da perfuração.

Em relação aos isótopos estáveis, as amostras coletadas nos extratores apresentaram composição isotópica mais leve em comparação às demais. As amostras do NAI-PZ01 (14 e 30 m), NAI-PZ03 e do rio Negro (NAI-RN) exibiram menor grau de empobrecimento e posicionaram-se próximas entre si e das retas meteóricas, indicando origem predominantemente meteórica e ausência de fracionamento evaporativo significativo. As amostras NAI-PZ02 e NAI-PZ04 diferenciaram-se daquelas do rio Negro e das demais unidades de Anavilhanas. O NAI-PZ04 apresentou composição mais empobrecida, sendo coletado durante o período de enchente, enquanto o NAI-PZ02, amostrado na vazante, mostrou valores relativamente menos empobrecidos. As amostras do rio Negro também evidenciaram variação sazonal, com maior empobrecimento isotópico no período de enchente em comparação à vazante.

Do ponto de vista hidroquímico e isotópico, são necessárias novas campanhas de amostragem para ampliar a base de dados e permitir interpretações mais robustas sobre a hidroquímica e a composição isotópica das águas subterrâneas e do rio Negro na região. Um maior número de amostras, distribuídas espacial e sazonalmente, possibilitará melhor compreensão dos processos de recarga, mistura e interação entre água superficial e subterrânea.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou a delimitação de um modelo conceitual hidrogeológico preliminar na região do Arquipélago de Anavilhanas. Este modelo compreende uma apresentação, na forma de seção, das características estratigráficas, sistemas de fluxos locais, intermediários e regionais a partir da relação água subterrânea-rio-chuva analisada durante o período entre julho de 2024 e outubro de 2025.

Inserido no contexto amazônico, os resultados indicam que o aquífero aluvionar apresentou contribuições limitadas para a estabilidade das cotas fluviais em um cenário de El Niño. A observação multinível em Anavilhanas permitiu a caracterização de fluxos predominantes descendentes e, por vezes, sem fluxo. A contribuição da água subterrânea para o rio Negro foi limitada apenas ao sistema de fluxos locais presentes nas topografias rasas da margem direita e da ilha de Anavilhanas e durante a estiagem (meados de setembro de 2024 a início de janeiro de 2025). O sistema intermediário concentra-se na porção central do canal do rio Negro e é representado por fluxos que receberam contribuição do rio durante todo o ciclo hidrológico analisado, espelhando suas variações e os eventos de repique. Este sistema recebe a contribuição do rio Negro e migra para sudeste na porção arenosa do leito do rio Negro, contribuindo a todo momento para os fluxos regionais. Estes, por sua vez, passam pela Formação Alter do chão e migram na direção W-E, e em nenhum momento contribuíram para os sistemas intermediários ou locais.

Com relação à recarga, o método do balanço hídrico permitiu verificar recargas anuais de 11% (2022), 24% (2023) e 8% (2025) a partir da precipitação. O ano de 2024 apresentou uma recarga anual de 9 mm, correspondendo a uma recarga praticamente nula a partir da precipitação. A redução observada da recarga acompanhou um acúmulo de déficit hídrico e reduções progressivas do armazenamento que antecedem os eventos de EL Niño. As seções de resistividade também possibilitaram delimitar que a recarga pela infiltração da água da chuva ocorre de maneira pontual e heterogênea.

A aplicação de métodos multidisciplinares viabilizou a caracterização da dinâmica hidrogeológica no aquífero aluvionar, mesmo diante de muitas dificuldades e imprevistos durante a execução desta pesquisa. A ausência de dados devido à falha técnica e ao furto dos equipamentos de monitoramento foi a maior adversidade encontrada, revelando a necessidade de máxima

cautela com atenção à segurança dos equipamentos e pesquisadores.

Para pesquisas futuras, a recomendação é a continuidade do monitoramento dos níveis subterrâneos, com a adição de interpretações dos dados dos piezômetros da margem direita do rio Negro, bem como de futuros piezômetros e poços já inseridos na Formação Alter do Chão, com o objetivo de observar a relação desta Formação com o rio Negro. Além disso, o seguimento das análises hidroquímicas e isotópicas da água subterrânea, do rio Negro, somadas às da chuva, contribuirá para maior robustez deste modelo, baseada na relação rio-aquífero-precipitação que compreenda anos de cheia extrema, assim como anos sem a atuação de eventos extremos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. G. de *et al.* **Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil**. [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/950832>>.
- ALVAREZ, R.; NIEDZIELSKI, H. Estimacion de la recarga en la subcuenca rio de las avenidas pachuca hidalgo méxico. In: **Congresso Latinoamericano de Hid. Sub.** [S.l.: s.n.], 1996. v. 3, p. 35–46.
- ALVES, N. de S. **MAPEAMENTO HIDROMORFODINÂMICO DO COMPLEXO FLUVIAL DE ANAVILHANAS. CONTRIBUIÇÃO AOS ESTUDOS DE GEOMORFOLOGIA FLUVIAL DE RIOS AMAZÔNICOS**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Filosofia, letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 7 2013. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-02082013-130114/pt-br.php>>.
- ANA. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e cidades pilotos (escala 1:50.000): Volume III – Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil**. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/07c7cf8f-6e81-4040-b405-8361f6b4cdf9/attachments/Volume_III-Hidrogeologia_e_Modelo_Numerico_de_Fluxo_da_PHA_no_Brasil.pdf>.
- ANA; UFPR. **Capacidade de água disponível - CAD ou AWC dos solos no Brasil**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/28fe4baa-66f3-4f6b-b0d2-890abf5910c4>>.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling : simulation of flow and advective transport**. [S.l.]: Academic Press, 2015. v. 2. 564 p. ISBN 9780120581030.
- ASSAAD, F. A.; LAMOREAUX, P. E.; HUGHES, T. H. **Field Methods for Geologists and Hydrogeologists**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. ISBN 978-3-662-05438-3. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-05438-3>>.
- BARBOSA, R. O. **Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do Arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2015. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/5016>>.
- BASTOS, A. S. *et al.* Isotope hydrogeology of precipitation runoff and groundwater discharge as source waters for stream flow in the central amazon. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 62, p. 102934, 2025. ISSN 2214-5818. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581825007633>>.
- BEZERRA, P. **Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões-Negro**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, 2003.
- BRANDENBURG, J. P. **Estruturas Geológicas para Modelos de Fluxo de Água Subterrânea**. The Groundwater Project, 2021. 37 p. ISBN 978-1-77470-007-5. Disponível em: <<https://gw-project.org/books/geologic-frameworks-for-groundwater-flow-models/>>.

BRASIL. MONITORAMENTO DE SECAS E IMPACTOS NO BRASIL: BOLETIM - SETEMBRO 2023, ANO 04, NÚMERO 64. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/monitoramento/monitoramento-de-seca-para-o-brasil/monitoramento-de-secas-e-impactos-no-brasil-2013-setembro-2023-1>>.

BRITO, A. P. de *et al.* Analysis of the rain anomaly index and precipitation trend for pluviometric stations in central amazonia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 37, p. 19–30, 2022. ISSN 19824351. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/CjnMcYLcgF894p8RKBFfn9K/?lang=pt>>.

BRITO, A. P. de; WAHNFRIED, I. D.; FERREIRA, S. J. F. de. Comparative analysis of recharge estimation methods for a microbasin in reserva florestal adolpho ducke, manaus - am. **Geologia USP - Serie Científica**, UNIV SAOPAULO, v. 21, p. 59–73, 9 2021. ISSN 1519874X. Disponível em: <<https://revistas.usp.br/guspsc/article/view/191182>>.

CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil**. Tese (Doutorado) — University of California, 2 1984. Disponível em: <<https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8961>>.

COSTA, F.; MARENGO, J. **DECLARAÇÃO SOBRE A SECA AMAZÔNICA DE 2023 E SUAS CONSEQUÊNCIAS IMPREVISTAS.** [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/secas-sem-precedentes-na-bacia-amazonica-sao-apontadas-pelo-observatorio-global-da-secas/231207AMAZONDROUGHTSTATEMENT_portugues3.pdf/view>.

COSTA, W. O aquífero aluvial e sua exploração racional. **Águas Subterrâneas**, 1986. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23582>>.

CRAIG, H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 133, n. 3467, p. 1833–1834, 1961.

CUNHA, D. F. d. **Evolução sedimentar do Arquipélago de Anavilhanas no baixo Rio Negro, Amazônia Central**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-24072023-085242/en.php>>.

CUNHA, P. R. da C.; MELO, J. H. G. de; SILVA, O. B. da. **Bacia do Amazonas**. [S.l.], 2007. Disponível em: <<https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/307/230>>.

DALL'OLIO, A. *et al.* Modelo de fracionamento isotópico da água na bacia amazônica (primeira aproximação). **Acta Amazonica**, SciELO Brasil, v. 9, n. 4, p. 675–687, 1979.

DIAMOND, R. E. **Stable Isotope Hydrology**. The Groundwater Project, 2022. 102 p. ISBN 978-1-77470-043-3. Disponível em: <<https://gw-project.org/books/stable-isotope-hydrology/>>.

D'OSWALDO, C. G. de S. S. **Execução de ensaios hidráulicos para determinação da condutividade hidráulica em poços de monitoramento instalados no Aquífero São Paulo, Guarulhos (SP)**. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://bdta.abcd.usp.br/item/003024033>>.

ERFANIAN, A.; WANG, G.; FOMENKO, L. Unprecedented drought over tropical south america in 2016: Significantly under-predicted by tropical sst. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 7, 7 2017. ISSN 20452322. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-017-05373-2>>.

FEITOSA, F. A. C. *et al.* **HIDROGEOLOGIA: Conceitos e Aplicações**. [S.l.], 2008. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>>.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. Prentice-Hall, 2001. ISBN 0-13-088239-9. Disponível em: <https://arjzaidi.files.wordpress.com/2015/09/unimasr-com_e7ce669a880a8c4c70b4214641f93a02.pdf>.

FILIZOLA, N. *et al.* The significance of suspended sediment transport determination on the amazonian hydrological scenario. In: _____. **Sediment Transport in Aquatic Environments**. IntechOpen, 2011. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/20911>>.

FILIZOLA, N. P. **O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da bacia Amazônica Brasileira**. [S.l.]: Aneel, 1999.

FRANZINELLI, E.; IGREJA, H. Modern sedimentation in the Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, p. 259–271, 2002.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-25042008-142218/en.php>>.

GASTMANS, D. *et al.* Contribuição dos isótopos estáveis da água (h e o) no conhecimento dos aquíferos brasileiros: estado da arte e perspectivas futuras. **Derbyana**, v. 42, out. 2021. Disponível em: <<https://revistaig.emnuvens.com.br/derbyana/article/view/734>>.

GIRARD, Y. B. B.; WAHNFRIED, I. D.; TRINDADE, P. H. D. Testes de bombeamento e traçador para determinar confinamento e parâmetros hidráulicos do aquífero alter do chão em manaus. **GEOCIÊNCIAS**, v. 42, p. 85–95, 6 2023. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/17389>>.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 91–109, 1 2002. ISSN 14312174. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0178-0>>.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground-water observations**. [S.l.]: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951.

IAH. **Groundwater— more about the hidden resource**. 2023. 1 p. Disponível em: <<https://iah.org/education/general-public/groundwater-hidden-resource>>.

ICMBIO. **Plano de Manejo do Parque Nacional de Anavilhanas**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/amazonia/lista-de-ucs/parna-de-anavilhanas/arquivos/plano_manejo_parna_de_anavilhanas.pdf>.

IRION, G. *et al.* Development of the amazon valley during the middle to late quaternary: sedimentological and climatological observations. In: **Amazonian floodplain forests: ecophysiology, biodiversity and sustainable management**. [S.l.]: Springer, 2010. p. 27–42.

JASECHKO, S. Global isotope hydrogeology – review. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 3, p. 835–965, 2019.

JUNK, W. J. **The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System**. Ecological studies. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997. v. 126. 531 p. ISBN 978-3662-03416-3.

LATRUBESSE, E. M.; FRANZINELLI, E. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. **Geomorphology**, v. 70, p. 372–397, 9 2005. ISSN 0169555X.

LEKULA, M.; LUBCZYNSKI, M. W.; SHEMANG, E. M. Hydrogeological conceptual model of large and complex sedimentary aquifer systems – central kalahari basin. **Physics and Chemistry of the Earth**, Elsevier Ltd, v. 106, p. 47–62, 8 2018. ISSN 14747065.

LIBERATO, A. M.; BRITO, J. I. B. de. Revista brasileira de geografia física influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 03, p. 170–180, 7 2010. Disponível em: <www.ufpe.br/rbgfe>.

LOUREIRO, E.; JANNUZZI, J.; SAUDINO, C. **BACIA DO AMAZONAS Sumário Geológico e Setores em Oferta**. [S.l.], 2021. 19 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/oferta-permanente/opc/arquivos/sg/amazonas.pdf>>.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do distrito federal. **Revista Brasileira de Geociências**, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 35, p. 407–414, 3 2005.

MACHADO, R. **Aplicação do método eletrorresistivo em ambiente aquático pra mapeamento do subfundo do rio São Francisco**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-18082008-082535/en.php>>.

MALDANER, C. H. **RECARGA DE AQUÍFERO EM ÁREA URBANA: ESTUDO DE CASO DE URÂNIA (SP)**. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 10 2010. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-08012011-201628/pt-br.php>>.

MARINHO, R. R. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no Arquipélago de Anavilhanas, Rio Negro - Amazonas, Brasil**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Universidade do Estado do Amazonas – UEA, 12 2019. Disponível em: <<https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/12984>>.

MONTEIRO, D. N. C. **Caracterização pedológica associada ao mapeamento digital de solos por geoestatística e espectroscopia na região do Parque Nacional de Anavilhanas (AM)**. 111 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Amazonas, 4 2023. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9616>>.

MOREIRA, W. P. **Variação espaço-temporal dos parâmetros físicos e químicos e do fluxo de elementos-traço como indicadores basais no Arquipélago Fluvial de Anavilhanas – AM**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Amazonas, 6 2019. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/7281>>.

NTONA, M. M. *et al.* Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 846, 11 2022. ISSN 18791026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722044539?via%3Dihub>>.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de thornthwaite-mather. **Agrometeorologia**, v. 64, p. 311–313, 2005. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/brag/a/x8tcTGb4PdPsghWjBNkw6rs/?lang=pt>>.

PETRONE, P. *et al.* Hydrogeological conceptual model and groundwater recharge of avella mts. karst aquifer (southern italy): A literature review and update. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Elsevier B.V., v. 54, 8 2024. ISSN 22145818. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581824002192>>.

PITA, R. C. d. S. *et al.* Sistema aquífero alter do chão a oeste da cidade de manaus (am): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. **Geologia USP. Série Científica**, Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP, v. 18, p. 273–296, 3 2018. Disponível em: <<https://revistas.usp.br/guspsc/article/view/147769>>.

QUEIROZ, M. S. de *et al.* Arquipélago de anavilhanas. **REVISTA GEONORTE**, Revista Geonorte, v. 15, 2 2024. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/12465>>.

RIBEIRO, A.; WAHNFRIED, I.; NETO, L. A. F. Levantamento de contaminações geogênicas e antrópicas em águas subterrâneas na cidade de novo airão. **REVISTA GEONORTE**, Revista Geonorte, v. 15, 2 2024. Disponível em: <<https://www.periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/view/12086>>.

RIOS-VILLAMIZAR, E. A. *et al.* Hydrochemical classification of amazonian rivers: A systematic review and meta-analysis. **Caminhos de Geografia**, PPUFU - Portal de Periódicos da Universidade Federal de Uberlândia, v. 21, p. 211–226, 12 2020. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/53272>>.

ROCHA, I. d. S.; ANDRADE, C. M. G. d.; REZENDE, M. G. G. Estratégias para mitigação dos impactos relacionados à seca extrema na vida rural amazônica. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 9, p. e7836, set. 2024. Disponível em: <<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/7836>>.

ROSARIO, F. F. d.; CUSTODIO, E.; SILVA, G. C. d. Hydrogeology of the Western Amazon Aquifer System (WAAS). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 72, p. 375–386, 2016. ISSN 0895-9811. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981116302309>>.

SAAD, E. B.; ALAYA, M. B.; TAUPIN, J. D.; PATRIS, N.; CHAABANE, N.; SOUISSI, R. A hydrogeological conceptual model refines the behavior of a mediterranean coastal aquifer system: A key to sustainable groundwater management (grombalia, ne tunisia). **Hydrology**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), v. 10, 9 2023. ISSN 23065338. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5338/10/9/180>>.

SALATI, E. *et al.* Recycling of water in the amazon basin: An isotopic study. **Water resources research**, Wiley Online Library, v. 15, n. 5, p. 1250–1258, 1979.

SHEPHERD, R. G. Correlations of permeability and grain size. **Groundwater**, Wiley Online Library, v. 27, n. 5, p. 633–638, 1989.

SILVA, F. C. de. **ANÁLISE INTEGRADA DE USOS DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA EM MACRO-ESCALA NUMA BACIA HIDROGRÁFICA: O CASO DO ALTO RIO PARANAÍBA**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 6 2007. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12689>>.

SILVA, T. A. da; ROSARIO, F. F. do; JUNIOR, G. C. da S. Environmental isotopes and hydrochemical tracers applied to hydrogeological conceptual modeling of the southwest portion of the amazon aquifer system (acre, brazil). **Applied Geochemistry**, Elsevier Ltd, v. 120, 9 2020. ISSN 18729134. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088329272030161X?via%3Dihub>>.

SILVA, V. C. *et al.* CaracterizaÇão hidrológica dos sistemas lacustres do arquipélago de anavilhanas com base em sensoriamento remoto. **Revista Geociências**, v. 39, p. 411–424, 7 2020. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/14357>>.

SILVEIRA, C. S.; JÚNIOR, G. C. da S. O uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos no brasil: uma resenha crítica. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 25, p. 25–43, 2002.

SIOLI, H. Studies in amazonian waters. In: CONSELHO NACIONAL DE PESQUISAS RIO DE JANEIRO. **Atas do simpósio sobre a biota amazônica**. [S.l.], 1967. v. 3, p. 9–50.

SOARES, E. A. A. *et al.* Sedimentology and palynostratigraphy of a pliocene-pleistocene (piacenzian to gelasian) deposit in the lower negro river: Implications for the establishment of large rivers in central amazonia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 79, p. 215–229, 2017. ISSN 0895-9811. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981116302735>>.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55–94, 1 1948. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/210739?origin=crossref>>.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. The water balance. centerton, nj: Drexel institute of technology-laboratory of climatology, 1955. 104p. **Publications in climatology**, v. 8, n. 1, 1955.

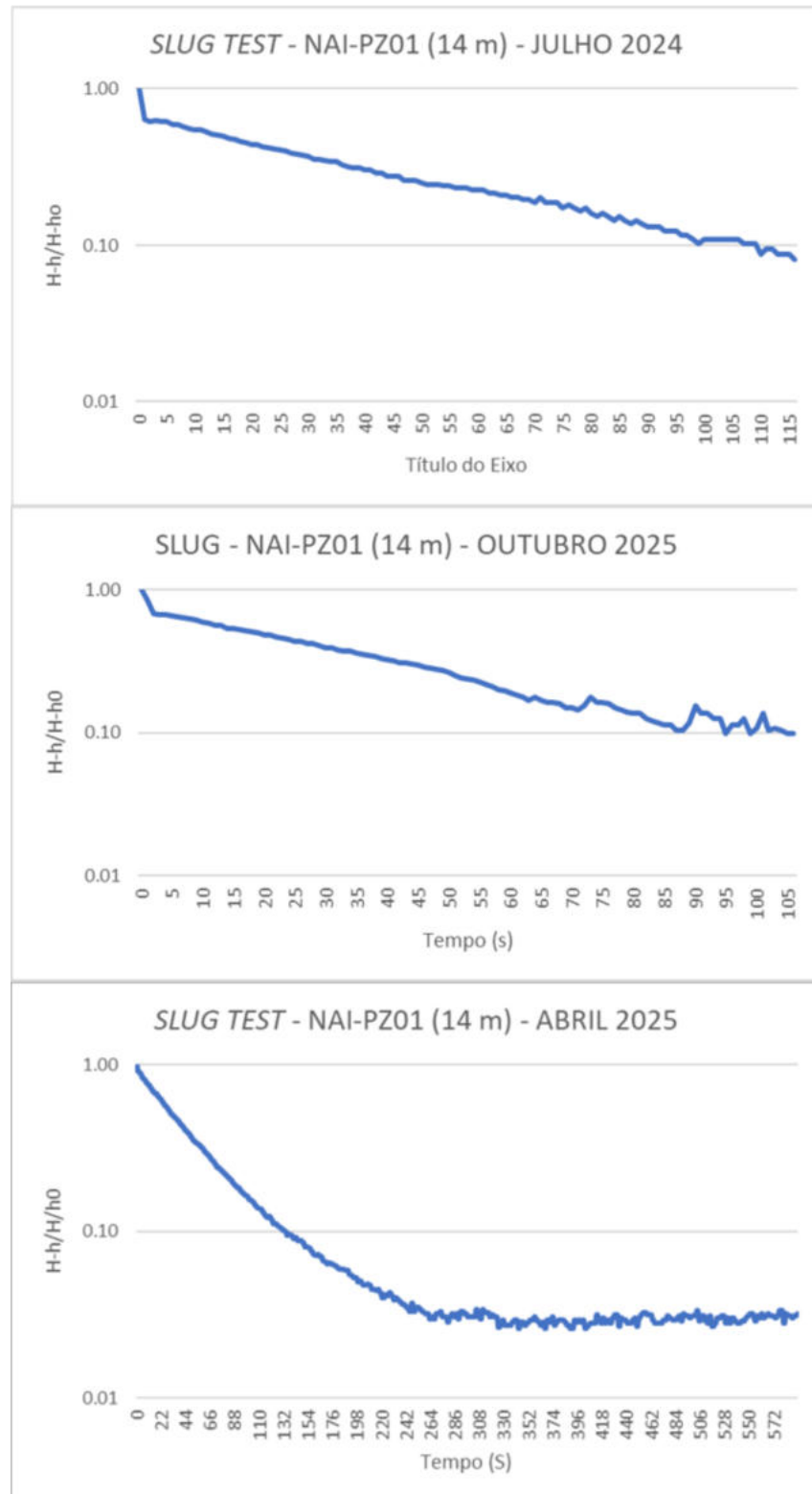
TRABELSI, F.; JOTHERS. Gis-based subsurface databases and 3-d geological modeling as a tool for the set up of hydrogeological framework: Nabeul-hammamet coastal aquifer case study (northeast tunisia). **Environmental Earth Sciences**, v. 70, p. 2087–2105, 11 2013. ISSN 18666280. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-011-1416-y>>.

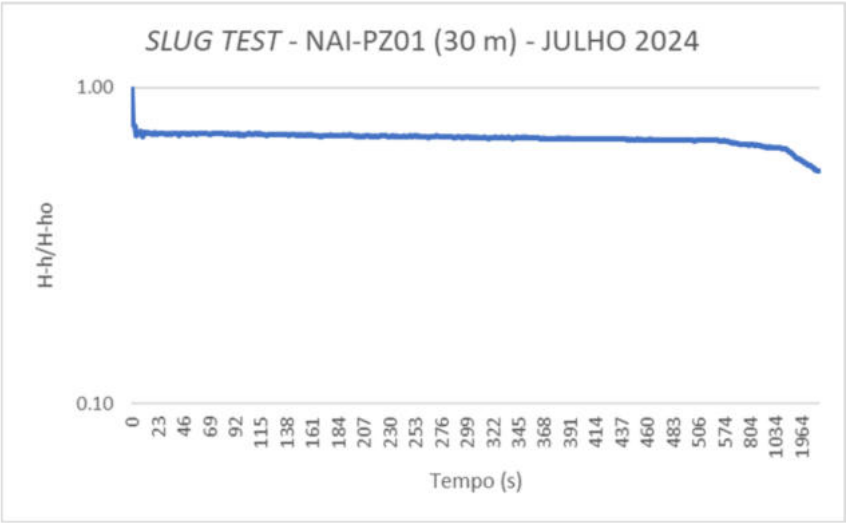
VIRGÍLIO, T. M. *et al.* Caracterização dos poços de águas subterrâneas no triângulo mineiro: estudo dos aspectos construtivos, hidrodinâmicos e energéticos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Companhia Brasileira de Producao Cientifica, v. 12, p. 273–292, 10 2021.

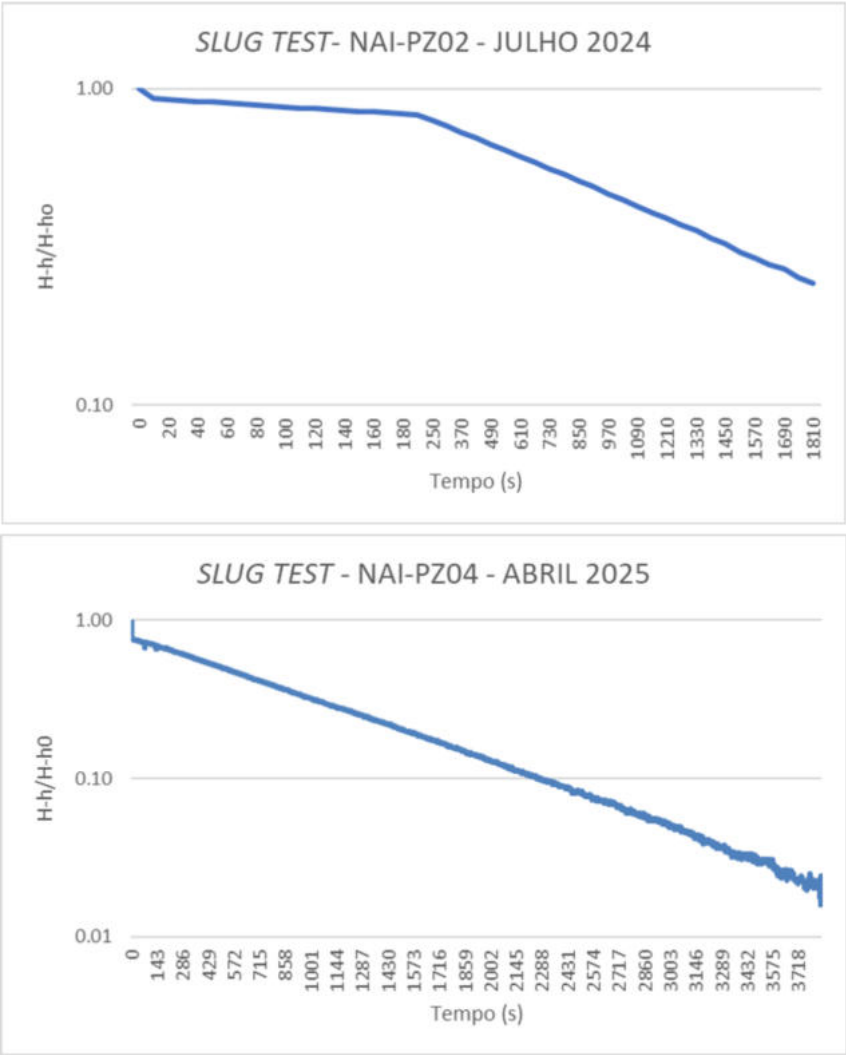
WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do alto tietê (são paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 15–25, 2005. ISSN 2318-0331. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=28&SUMARIO=459https://repositorio.usp.br/item/003160499>>.

YIN, J.; TSAI, F. T.-C.; KAO, S. C. Accounting for uncertainty in complex alluvial aquifer modeling by bayesian multi-model approach. **Journal of Hydrology**, Elsevier B.V., v. 601, 10 2021. ISSN 00221694. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421007307#:~:text=To%20better%20understand%20groundwater%20dynamics%20and%20improve%20model,model%20parameter%20uncertainty%20in%20complex%20alluvial%20groundwater%20modeling.>>>

APÊNDICE A – GRÁFICOS DOS TESTES HIDRÁULICOS







APÊNDICE B – GRÁFICOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

