

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

WILLIAN BARROS DO NASCIMENTO

MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E SOLOS NO
PERÍMETRO URBANO DE MANACAPURU, AMAZONAS

MANAUS
2024

WILLIAN BARROS DO NASCIMENTO

MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E SOLOS NO
PERÍMETRO URBANO DE MANACAPURU, AMAZONAS

Dissertação de Mestrado submetida 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.

Orientador: Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried

MANAUS
2024

Ficha Catalográfica

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

Nascimento, Willian Barros do
N244m Mineralogia e geoquímica de sedimentos e solos no
perímetro urbano de Manacapuru, Amazonas / Willian
Barros do Nascimento . 2024
72 f.: il.; 31 cm.

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

1. Mineralogia. 2. Geoquímica de sedimentos. 3. Solos. 4.
Águas subterrâneas. I. Wahnfried, Ingo Daniel. II.
Universidade Federal do Amazonas III. Título

WILLIAN BARROS DO NASCIMENTO

MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E SOLOS NO
PERÍMETRO URBANO DE MANACAPURU, AMAZONAS

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

Aprovado em: 30 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 INGO DANIEL WAHNFRIED
Data: 08/03/2025 09:37:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 ALDERLENE PIMENTEL DE BRITO
Data: 10/03/2025 10:24:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 KEILA CRISTINA PEREIRA ANICETO
Data: 12/03/2025 11:46:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Keila Cristina Pereira Aniceto, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial a minha mãe Jacilene Barros, meu filho Arthur Emanuel, a minha avó Ana Leude Raimunda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e minha família, pelo apoio em alguns momentos difíceis e no auxílio para realização deste trabalho, em especial minha mãe Jacilene Barros ao meu pai Edilson Raimundo Nascimento a minha vó Leude Raimunda e a minha tia Ivanderlane Lobo.

Ao professor Dr. Ingo Daniel, pela orientação, ensinamentos, críticas construtivas para a realização deste trabalho.

Aos professores Drs. Keila Aniceto e Martha, pela orientação, disponibilidade, e valiosas sugestões durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Colegas Jefter Haad Ruiz da Silva e Ludimila Souza Oliveira pela ajuda na coleta de amostras em campo.

À Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, pela oportunidade de realização deste curso. A FAPEAM, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Laboratórios de Análises Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, pela realização sem custo da análise granulometria feito pelo Granulometro a Laser.

Ao Superintende do Serviço Geológico do Brasil, Sr. Marcelo Motta, pela autorização sem custo das análises mineralógicas por Difração de Raios X.

Ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC, na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, pela realização sem custo da análise química por Fluorescência de Raios x.

Aos meus irmãos Williana Barros, Williara Barros, Welleasandro Barros e Williandra Barros, Gabriele Safira Marinho e Antonio Deiner Marinho pelo companheirismo, ajuda e incentivos constantes durante a minha jornada no curso de mestrado.

Aos meus amigos Sebastião Ramos, Angélica Cristina e Ludimila Sousa por caminharem junto comigo nesta incrível jornada do mestrado PPGGEO.

RESUMO

Na região norte, 57% das sedes municipais utilizam aquíferos como fonte única de abastecimento, enquanto 13% combinam aquíferos e águas superficiais para obter sua água. A importância dos aquíferos se deve à boa qualidade e acessibilidade da água, especialmente em períodos de estiagem. Contudo, seu uso sem avaliação adequada pode expor a população a contaminações naturais. O presente trabalho caracterizou os sedimentos de superfície e subsuperfície das unidades geológicas da área urbana de Manacapuru/AM, visando identificar elementos que possam impactar a qualidade da água subterrânea. Foram amostrados 16 pontos próximos a poços tubulares, com furos de sondagem a trado atingindo 2 a 5 m de profundidade. As amostras foram coletadas a cada metro ou quando havia mudanças significativas na litologia. No ponto P11-União, também foram coletados sedimentos até 174 m, durante a perfuração de um poço tubular profundo. No total, 138 amostras foram selecionadas para análise granulométrica, sendo 16 submetidas a análises de fluorescência e difração de raios X. Os resultados revelaram perfis estratigráficos com camadas intercaladas de areia, silte e argila. A análise química identificou dez óxidos, com predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A mineralogia apontou a presença de quartzo, caulinita, goethita, gibbsita, hematita, rutilo, microclínio e nontronita. Embora trabalhos anteriores indiquem flúor na água subterrânea, neste estudo, traços de esmectita e vermiculita, minerais potencialmente associados ao flúor, foram encontrados apenas no ponto Poço União, em 160 m de profundidade. Nas amostras rasas analisadas não foram detectados minerais com flúor. A identificação de esmectita e vermiculita na região sugere a necessidade de investigação aprofundada desses minerais devido à possível presença de flúor.

Palavras chaves: Mineralogia; Geoquímica de sedimentos; Solos; Águas subterrâneas.

ABSTRACT

In the northern region of Brazil, 57% of the cities rely on aquifers for water supply, while 13% combine aquifers and surface water sources. Aquifers are preferred due to the good quality and accessibility of their water resources, especially during drought periods. However, their use without proper evaluation may expose populations to natural groundwater contamination. This study characterized the surface and subsurface sediments of geological units in the urban area of Manacapuru, State of Amazonas, to identify elements that could impact groundwater quality. Sixteen sampling points near tubular wells were selected, with auger drilling reaching depths of 2 to 5 meters. Samples were collected every meter or when significant lithological changes were observed. At point P11-União, sediments were also collected down to 174 meters during the drilling of a deep tubular well. A total of 138 samples were selected for granulometric analysis, and 16 samples underwent X-ray fluorescence and diffraction analyses. The results revealed stratigraphic profiles with interbedded layers of sand, silt, and clay. Chemical analysis identified ten oxides, predominantly SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 . Mineralogical analysis showed the presence of quartz, kaolinite, goethite, gibbsite, hematite, rutile, microcline, and nontronite. Although previous studies indicated the presence of fluoride in groundwater, this study found traces of smectite and vermiculite minerals potentially associated with fluoride only at point Poço União at a depth of 160 meters. No fluoride-containing minerals were detected in the shallow samples analyzed. The identification of smectite and vermiculite in the region highlights the need for further investigation of these minerals due to their potential fluoride content.

Keywords: Mineralogy; Sediment Geochemistry; Soils; Groundwater

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, com a indicação dos pontos distribuídos ao longo do perímetro urbano. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 - Morada do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 – Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 - União; P12 – São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.....	19
Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Amazonas. Fonte: Modificado de Souza, E. L. et al., (2012).....	21
Figura 3: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas. Fonte: Modificada de Eiras, 1998	23
Figura 4: Geologia do município de Manacapuru, Amazonas	25
Figura 5: Mapa de solos do município de Manacapuru, Amazonas.	27
Figura 6: Tipos de solos na área de estudo, município de Manacapuru-AM. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos: P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 - Morada do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 – Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 - União; P12 – São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.	30
Figura 7: Esquema do funcionamento do Granulômetro a Laser.	32
Figura 8: Fluxograma metodológico. Fonte. Nascimento, W. B.	36
Figura 9: Coleta de amostras de sedimentos feita com o trado. A - Limpeza do terreno. B – Trado manual com caçamba. C - Amostras sendo retirada a cada 20 cm de profundidade. D - Sequências de amostras retiradas com trado (Fonte: Nascimento, W. B.).	38
Figura 10: Sistema de Circulação da lama de perfuração. Fonte: Martins Netto (2011), modificado de Bianchi Netto (2009).	43
Figura 11: Canaletas que conectam os tanques de deposição e sucção da lama. ...	44
Figura 12: Preparação das amostras para análise, granulométrica, mineralógica e químicas dos sedimentos.	47
Figura 13: Granulômetro a Laser Bettersizer ST – <i>Particle Size Analysis Report</i>	47
Figura 14: Geologia do município de Manacapuru, Amazonas.	55

Figura 15: Mapa de localização da área de estudo, com a indicação dos pontos distribuídos ao longo do perímetro urbano. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 – Mora do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 – Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 – União e PP-Poço profundas; P12 – São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.....	56
Figura 16:Distribuição do tamanho de partículas de amostras de sedimento coletadas no perímetro urbano municipal da cidade de Manacapuru, Amazonas.....	58
Figura 17: Distribuição do tamanho de partículas de amostras de sedimento coletadas do poço profundo situado no perímetro urbano municipal da cidade de Manacapuru, Amazonas.	59
Figura 18: Seção geologica da área de estudo.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detalhes da localização dos pontos amostrais.....	20
Tabela 2: Localização, número de amostras coletadas com trado em cada ponto, profundidade inicial e final.....	39
Tabela 3: Profundidades das amostras coletadas com trado manual nas unidades geológicas do município de Manacapuru-AM, ano 2021.....	40
Tabela 4: Amostras de sedimentos do poço união em construção no Bairro União, Manacapuru-AM.....	45
Tabela 5: Composição mineralógica das frações granulométrica das amostras superficiais e subsuperficiais da área de estudo.....	61
Tabela 6: Análises granulométrica e química das amostras coletadas com trado da Área de estudo: P01 – Correnteza; P02 – Padres; P03 – Terra Preta; P04 – Morada do Sol; P05 - Biri-Biri; P07 - Atila Lins; P08 - São José; P09 - Novo Manacá; P10 – Palhinha; P11 - União; P12 - São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.....	64

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

AAC - Aquífero Alter do Chão

BSA - Bacia Sedimentar do Amazonas

SGB - Serviço Geológico do Brasil

DRX - Difração de Raios X

FRX - Fluorescência de Raios X

FAC - Formação Alter do Chão

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Rede Vigifluor - Rede Brasileira de Vigilância da Fluoretação da Água

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

UFAM - Universidade Federal do Amazonas

VMP - Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Geral.....	18
2.2 Específicos.....	18
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO.....	19
3.1 Localização e acesso.....	19
4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL: A BACIA SEDIMENTAR DO AMAZONAS.....	21
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	24
5.1 Clima.....	24
5.2 Geomorfologia.....	24
5.3 Geologia Local.....	25
5.4 Solos.....	26
6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
6.1 Granulometria por difração a laser.....	31
6.2 Fluorescência de Raios X – FRX.....	32
6.3 Difração de Raios X – DRX.....	32
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
7.1 Aquisição de dados existentes na bibliografia, sites da internet e repositórios.....	35
7.2 Seleção dos pontos de coleta em campo.....	36
7.3 Coleta de amostras de sedimentos com trado.....	37
7.3.1 <i>Descrição do processo de coleta com trado</i>	37
7.4 Coleta de amostras de sedimentos durante perfuração de poço tubular profundo.....	42
7.4.1 <i>Método de perfuração de poços tubulares profundos com broca rotativa e circulação direta de lama</i>	42

7.4.2 Coleta de amostras de sedimentos durante a perfuração do poço.....	44
7.5 Tratamento e análises das amostras em laboratório.....	46
7.5.1 Preparação de amostras.....	46
7.5.2 Análise granulométrica por difração a laser.....	47
7.5.3 Análise por Fluorescência de Raios X (FRX).....	47
7.5.4 Análise por Difração de Raios X (DRX).....	48
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
Granulometria.....	57
Mineralogia dos sedimentos.....	60
Análises de granulometria e química dos sedimentos.....	62
CONCLUSÕES.....	66
AGRADECIMENTOS.....	66
9. REFERÊNCIAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Amazonas possui população estimada de pouco mais de 4.281.000 de habitantes (IBGE, 2024), a maioria concentrada ao longo das margens dos mais de 25 mil quilômetros de águas navegáveis. Apesar da rica disponibilidade hídrica em superfície, 57% das sedes municipais utilizam aquíferos como fonte única de abastecimento, enquanto 13% usam tanto os rios como aquíferos (ANA, 2021). As principais razões para a preferência por aquíferos são a boa qualidade intrínseca que a água subterrânea predominantemente possui, e sua acessibilidade em qualquer área com aquíferos freáticos, já que a alta taxa de precipitação gera níveis de água rasos, logo, acessíveis.

A composição da água subterrânea é definida pela interação com o meio, sendo determinada pelas características dos sedimentos e rochas na superfície e subsuperfície. Para que a água possa ser utilizada para consumo humano, é necessário que os solutos dissolvidos em sua composição não ultrapassem as concentrações estabelecidas como seguras pela Portaria de Consolidação nº 888/2021 do Ministério da Saúde. Caso contrário, essa água não pode ser utilizada para consumo humano. Há situações específicas em que as características químicas da água geradas por essa interação podem ser prejudiciais à saúde.

Entre os contaminantes inorgânicos da água subterrânea com potencial de risco à saúde, podem ser citados: arsênio, mercúrio, chumbo, cádmio, bário, cobre, flúor, cromo e zinco. Esses elementos estão entre os mais frequentes nas águas subterrâneas e constam na Priority List of Hazardous Substances (CERCLA, 2017).

Amini, et al. (2008) elaboraram um mapa mundial de probabilidade de ocorrência do arsênio. O trabalho mostra alta probabilidade de ocorrência na Amazônia em áreas com a presença de sedimentos recentes, ricos em matéria orgânica, pH neutro e Eh redutor. O arsênio é um metalóide sólido, cristalino, com os estados de valências -3, 0, +3 e +5 Smedley e Kinniburgh, (2002) sendo o trivalente e pentavalente os mais comuns em águas subterrâneas, podendo ser de origem orgânica ou inorgânica (Amini et al. 2008). O arsênio geogênico encontra-se adsorvido em superfícies intemperizadas dos sedimentos, associado aos óxidos e hidróxidos de ferro, e torna-se móvel na água em condições de pH entre 6.5-8.5, Eh negativo e ambiente ricos em matéria orgânica (Smedley & Kinniburgh, 2002). Pesquisas realizadas no continente asiático identificaram os principais fatores que influenciam

na ocorrência da contaminação geogênica por arsênio em água subterrânea: a existência de planícies de inundação e deltas, áreas com presença de grande aporte de sedimentos recentes e matéria orgânica, água com pH neutro, condições redutoras e baixas concentrações de oxigênio dissolvido (WINKEL; BERG; STENGEL & ROSENBERG, 2008).

Trabalhos como de Matheus (2017), Fernandes Neto (2018) e de Meyer et al. (2023) detectaram a ocorrência de alumínio, arsênio, ferro e manganês em água subterrânea de poços rasos e profundos em Careiro Várzea, ao longo dos rios Solimões, Madeira e da BR-319, indicando forte correlação entre a presença destes três últimos elementos). Pita et al. (2018) e Rede Vigiflúor (2020) identificaram a presença de concentrações de cloretos, nitratos e flúor em poços que abastecem o município de Manacapuru. O flúor é um elemento químico essencialmente necessário a processos biológicos. No ambiente, é encontrado na forma de fluoretos, incorporando-se à água através da lixiviação dos solos e minerais de sedimentos, além de serem agregadas à atmosfera através de erupções vulcânicas e tempestades de areia (ELLWOOD et al. 2011, p. 293).

O município de Manacapuru, situado a aproximadamente 100 km da capital do Amazonas (Manaus), possui população de quase 102 mil habitantes (IBGE, 2022). O pouco conhecimento que se tem acerca das características geoquímica de sedimentos das unidades geológicas presentes na área urbana do município, em conjunto como a ocorrência de concentrações altas de alumínio, ferro, flúor e manganês localmente no Aquífero Alter do Chão, que ali é utilizado por poços de abastecimento público, torna a análise sedimentológica para determinar a probabilidade de ocorrência e origem contaminantes geogênicos ou/e antrópicos na água subterrânea uma prioridade. Verificar a correlação entre geoquímica e hidroquímica, observando em especial à ocorrência de contaminantes geogênicos na água subterrânea, torna-se extremamente relevante.

1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos realizados pela Rede Brasileira de Vigilância da Fluoretação da Água Rede Vigifluor, (2015), Pita et al. (2018) e Silva, (2022), identificaram concentrações de fluoreto presente no solo/sedimentos e na água de abastecimento público de poços profundos relativamente elevados na região de Manacapuru/AM. Os teores de fluoreto das águas subterrâneas do município não são considerados danosos para a saúde humana. Ainda assim, o estudo das características geoquímica dos solos e sedimentos das unidades geológica da área de estudo despertou interesse no âmbito científico, uma vez que o entendimento dos mecanismos de elevação das concentrações flúor nessas águas pode ajudar a compreender a origem do fluoreto registrado em águas subterrâneas profundas através dos estudos geoquímicos e mineralógicos da superfície e subsuperfície (solos e sedimentos) da formação geológica onde estudo foi feito (Silva, 2022). As peculiaridades geológicas e hidrogeológicas da área a tornam importante para a investigação da geoquímica dos solos e da água subterrânea. Neste sentido, a pesquisa buscou verificar a origem do flúor na unidade geológica, através de estudos geoquímicos e mineralógicos, utilizando-se técnicas de Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X .

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar as características geoquímicas de sedimentos das unidades geológicas presentes na área urbana do município de Manacapuru, em superfície e subsuperfície.

2.2 Específicos

Atrelado ao objetivo principal do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram alcançados:

- Determinação da composição mineralógica dos sedimentos adjacentes aos poços de abastecimento de água da cidade de Manacapuru;
- Determinação da composição química dos sedimentos da área urbana do município de Manacapuru;
- Geração de uma base de informação para correlacionar a mineralogia com a geoquímica dos sedimentos da área urbana do município.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO ESTUDO

3.1 Localização e acesso

A área de estudo está situada no município de Manacapuru, porção central do Estado do Amazonas. A cidade fica na margem esquerda do rio Solimões, confluência com foz do rio Manacapuru. A área estudada compreende o perímetro urbano municipal de Manacapuru, onde foram realizadas coletas de amostras de sedimentos em dezesseis pontos amostrais (Figura 1 e Tabela 1). O município de Manacapuru possui uma área territorial de aproximadamente 7.330.066 km² (IBGE, 2021). Seus limites são definidos ao norte, pelos municípios de Novo Airão e Iranduba; ao sul, Beruri; a leste Manaquiri e Careiro da Várzea; e a oeste, Anamá e Caapiranga. O acesso a Manacapuru, a partir da capital amazonense Manaus, pode ser feito por via terrestre através da estrada Manoel Urbano (AM-070), ou por via fluvial, através da interligação do rio Negro e rio Solimões.

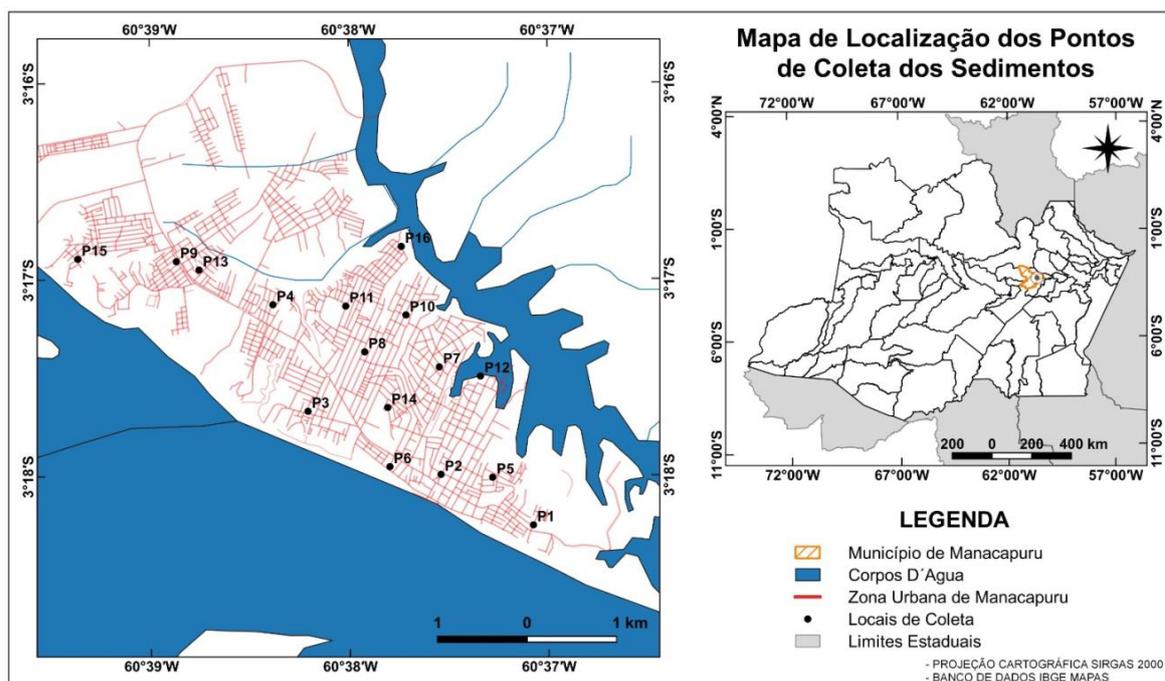


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, com a indicação dos pontos distribuídos ao longo do perímetro urbano. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 - Morada do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 - Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 - União; P12 - São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.

Tabela 1: Detalhes da localização dos pontos amostrais

Ponto	Localização	Latitude	Longitude
Correnteza	Poço Correnteza	3°18'18,2"S	60°36'41,5"W
Padres	Poço Padres	3°17'59,6"S	60°37'14,9"W
Terra Preta	Poço Terra Preta	3°17'36,3"S	60°38'03,0"W
Morada do Sol	Poço Marada do Sol	3°16'57,2"S	60°38'15,6"W
Biri-Biri	Poço Biri Biri	3°18'00,7"S	60°36'56,2"W
IDAM	Poço IDAM	3°17'56,7"S	60°37'33,4"W
Atila Lins	Poço Atila Lins	3°17'20,2"S	60°37'15,4"W
São Jose	Poço São Jose	3°17'14,6"S	60°37'42,4"W
Novo Manacá	Poço Novo Manacá	3°16'41,3"S	60°38'50,5"W
Palhinha	Poço Palhinha	3°17'01,1"S	60°37'27,4"W
União	Poço União	3°16'57,8"S	60°37'49,2"W
São Francisco	Poço São Francisco	3°17'23,6"S	60°37'00,5"W
Lago Azul	Poço Lago Azul	3°16'44,4"S	60°38'42,3"W
Figueirinha	Poço Figueirinha	3°17'35,0"S	60°37'34,1"W
Vale Verde	Poço Vale Verde	3°16'40,3"S	60°39'26,2"W
Divino Santo	Igreja Divino Espírito Santo	3°16'36,0"S	60°37'29,0"W

4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL: A BACIA SEDIMENTAR DO AMAZONAS

A área de estudo está situada na Bacia Sedimentar do Amazonas (BSA), que ocupa partes dos estados do Amazonas e do Pará e, em menor proporção, o estado do Amapá. É uma bacia que possui uma unidade sedimentar do tipo intracratônica com uma superfície de aproximadamente 500.000 Km², com 1.300 km de comprimento e 380 km de largura em média. Separa-se da Bacia do Marajó pelo Arco de Gurupá ao leste e da Bacia do Solimões pelo Arco do Purus ao oeste (Figura 2).

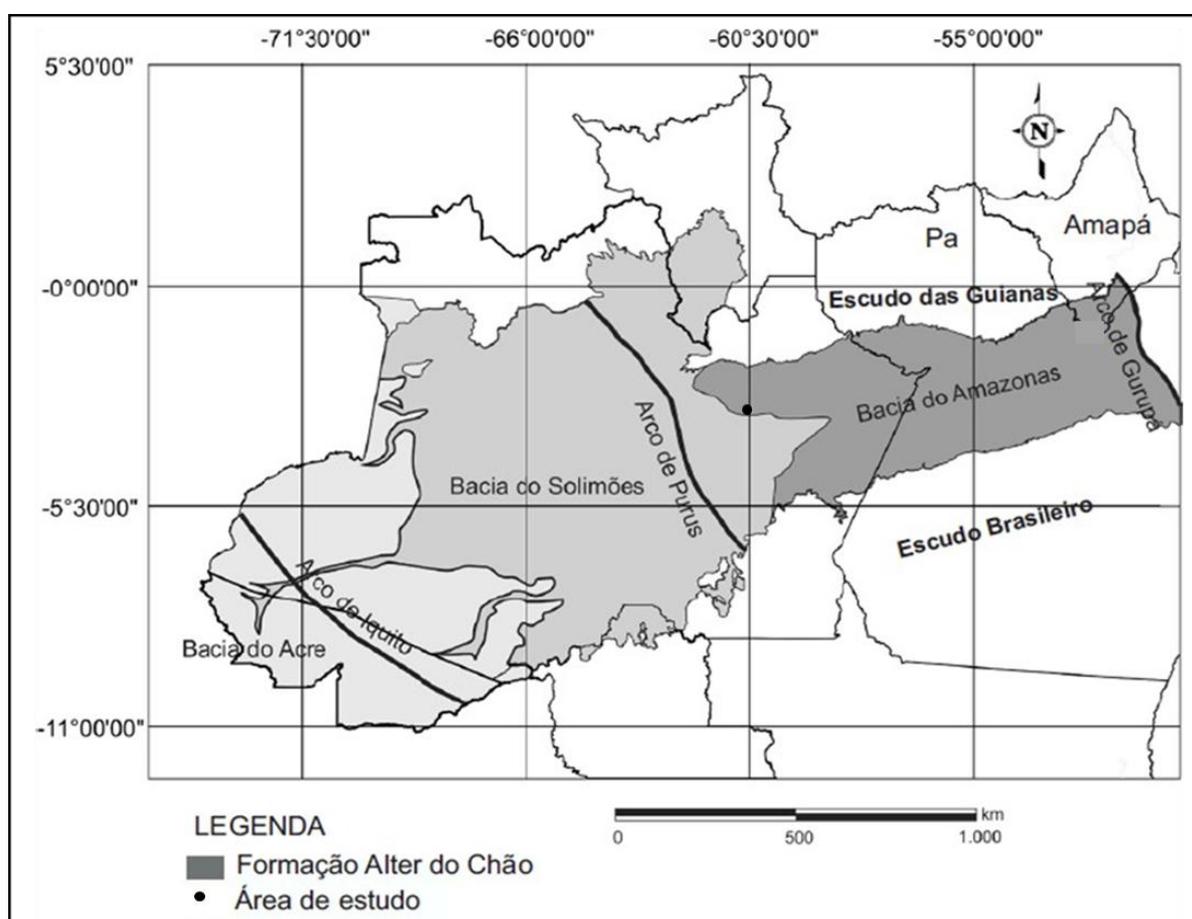


Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Amazonas. Fonte: Modificado de Souza, E. L. et al., (2012).

A BSA possui um preenchimento sedimentar de aproximadamente 5.000 m de espessura, sendo constituída basicamente de rochas paleozoicas conhecidas do Ordoviciano ao Permiano, intrudidas por diques e soleiras de diabásio do final do Triássico, recobertas por rochas cretáceo-terciárias (CAPUTO, 1984; REIS et al., 2006; CUNHA et al., 1994; 2007). O embasamento cristalino da BSA é formado por

rochas graníticas de idades Proterozoica (Cunha, et al. 1994). Com empilhamento caracterizado por três sequências sedimentares que se estendem do Ordoviciano ao Devoniano, sendo está a primeira, a segunda do Devoniano ao Carbonífero e uma terceira do Carbonífero ao Permiano. A sucessão de sequências deu origem aos grupos Trombetas, Curuá, e Tapajós, respectivamente e representa diversas unidades estratigráficas formadas pela geração sucessiva de eventos geológicos. Na parte superior Figura 3, encontra-se o Grupo Javari, cuja idade está relacionada ao Neocretáceo que inclui a Formação Alter do Chão, alvo do presente estudo (CUNHA et al., 1994).

CARTA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO AMAZONAS											
Tempo Geol. M.a.	Era	Geocron.		Unidades		Seqüências Deposicionais	Evolução Tectônica	Ambiente			
		Período	Época	Gr.	Fm.						
100 150 200	Mesozóico	Terc.	Cretáceo	Neo	Javari	Solimões	K-T		Fluvial Lacustre		
				Eo		Alter do Chão					
		Jurássico	Neo	Tapajós	Andirá	C-P					
			Meso								
			Eo								
		Triássico	Neo	Curuá	Faro	D-C					
			Meso								
			Eo								
		250 300 350 400 450 500	Paleozóico	Permiano	Neo	Tapajós	Andirá	C-P			Fluvial Lacustre
					Eo						
Carbonífero	Pensilvani.			Neo	Curuá	Faro	D-C			Fluvial, Deltaico, Glacial, Marinho Raso a Profundo	
				Meso							
	Eo										
	Mississippiano			Neo							N. Olinda
Devoniano	Urupadi			Neo	Curuá	Faro	D-C			Fluvial, Deltaico, Glacial, Marinho Raso a Profundo	
				Eo							
	Meso										
	Eo										
Siluriano	Trombetas	Neo	Trombetas	Manacapuru	O-D			Deltaico, Marinho Raso a Profundo			
		Meso									
		Eo									
Ordovic.	Autás-Mirim	Neo	Autás-Mirim								
		Eo									
Pré-cambriano	Purus	Acari	Purus	Prosperança			Rift	Fluvial/ Aluvial			
		Prosperança									

Mod. de Eiras et al., 1998

Figura 3: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas. Fonte: Modificada de Eiras, 1998

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

5.1 Clima

A alta pluviosidade é um dos aspectos característicos da região. Dados pluviométricos da Estação Manacapuru A119, indicam precipitação média anual de 2.190 mm. O período chuvoso geralmente inicia-se entre os meses de dezembro a maio, e o período de seca compreende os meses de julho a novembro. A temperatura média anual varia entre 22,0 e 31,7°C, e a umidade relativa do ar varia entre 77% a 84% (D'ANTONA et al, 2007). Segundo o mapa atualizado de Köppen-Geiger (Kottek et al, 2006), Manacapuru pertence à categoria Af, de clima equatorial, com médias mensais de precipitação bem acima de 60 mm e dos 18 °C que definem esta classe climática.

5.2 Geomorfologia

A região de Manacapuru apresenta duas unidades geomorfológicas de destaque: os platôs dissecados e as planícies fluviais de acumulação. Os platôs dissecados consistem em áreas caracterizadas por superfícies tabulares e colinosas, separadas por encostas que exibem diferentes níveis de elevação. Nessas áreas, as cotas variam de 50 a 100 metros, configurando as terras firmes associadas às rochas sedimentares da Formação Alter do Chão. Essas rochas, amplamente submetidas a processos de intemperismo e lateritização, contribuem para a formação de solos bastante alterados e ricos em óxidos de ferro, comuns na região amazônica (D'ANTONA et al., 2007).

Por outro lado, as planícies fluviais de acumulação são áreas planas, onde o acúmulo de sedimentos fluviais ocorre de forma periódica. Essas planícies, frequentemente inundadas de maneira sazonal, incluem várzeas e planícies aluvionares, que desempenham um papel fundamental no equilíbrio hidrológico e ecológico da região. Elas apresentam uma diversidade de formas, como diques marginais, canais anastomosados, lagos, paranás, igarapés, igapós e ilhas. Esses elementos criam um mosaico ambiental que suporta uma rica biodiversidade e favorece atividades como pesca e agricultura de subsistência, típicas das comunidades locais (D'ANTONA et al., 2007).

5.3 Geologia Local

Na Figura 4 são mostradas as unidades geológicas que afloram no município de Manacapuru: Formação Áter do Chão, Depósitos Aluvionares Holocênicos, Formação Içá, Formação Solimões e Terraços Holocênicos.

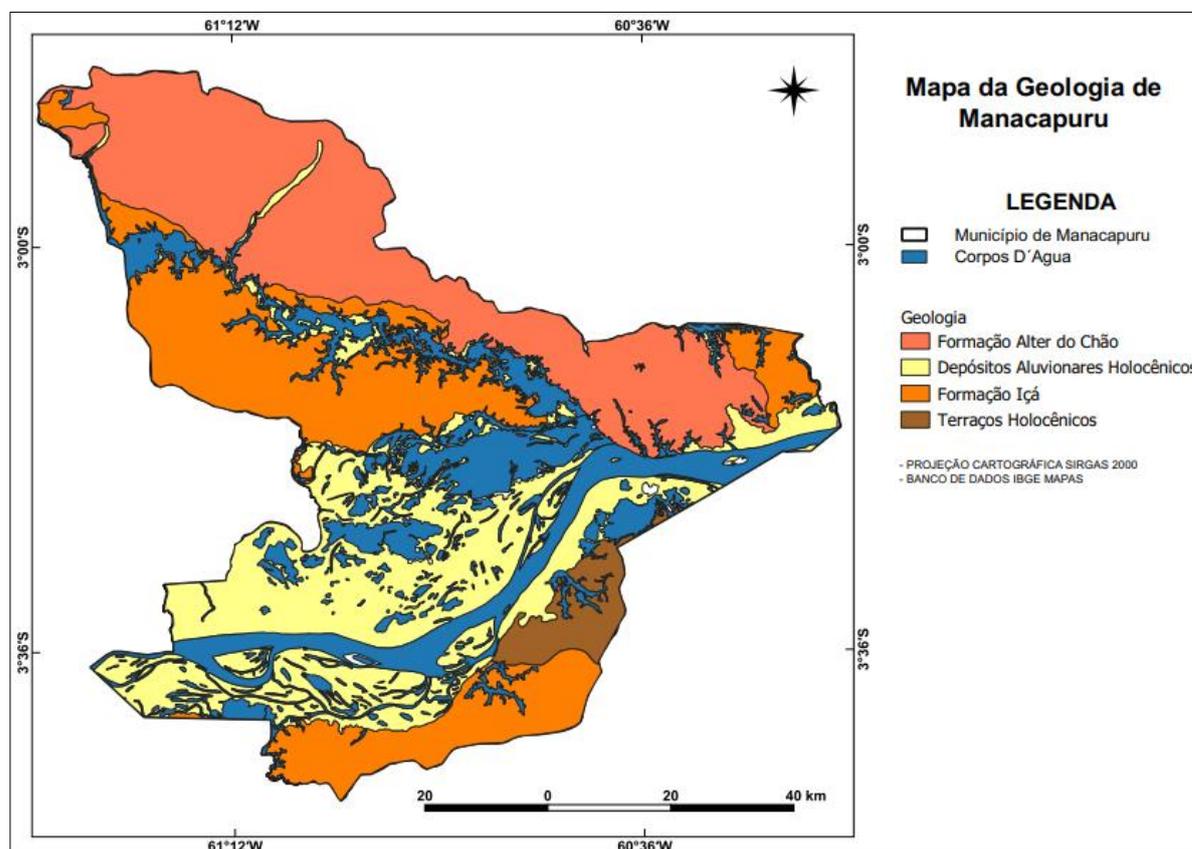


Figura 4: Geologia do município de Manacapuru, Amazonas (IBGE, 2020, com base em dados do projeto RADAMBRASIL)

A área de estudo está situada sobre a Formação Alter do Chão (FAC), depositada no Cretáceo Superior. Ela ocupa uma extensa faixa que se estende para a porção noroeste (NW) do município de Manacapuru, sendo a unidade de maior representatividade em termos de extensão para a região. A FAC é composta principalmente por arenito feldspato/caulinítico, arenito quartzoso e conglomerado com estratificação cruzada, acanaladas e tabulares, interpretados como depósitos de canais fluviais, com fácies subordinadas de siltitos, folhelhos e argilitos relacionados a ambiente lacustre (CAPUTO, 1984; VIEIRA, 1999; NOGUEIRA et al. 1999; CUNHA et al. 2007).

Bezerra et al. (2022) separam os depósitos aluvionares na área de Manacapuru em duas unidades, uma inferior (T3) e a superior (T2), ambas com idade pleistocênica,

possuindo fácies sedimentares semelhantes que consistem em areia muito fina a cascalho, com camadas de argila subordinadas, organizadas em ciclos de granodecrescência ascendente em escala métrica. Segundo os autores, os depósitos T3 e T2 são separados por uma superfície erosiva, e representam fases de agregação sedimentar e incisão dentro do vale do Rio Amazonas. A Unidade T3 é separada dos arenitos cretáceos subjacentes fortemente intemperizados por uma grande discordância, marcada por um paleossolo laterítico que possui uma crosta de hematita/goethita (Bezerra et al., 2022).

A Formação Içá é composta por intercalações de arenitos finos a médios e conglomerados argilosos que se sobrepõem em contato discordante à Formação Solimões. Isso indica um ambiente sedimentar fluvial meandrante de deposição (MOTTA, 2002).

5.4 Solos

Os tipos de solos presentes refletem em grande parte nas propriedades do material de origem, bem como os efeitos de fatores como condições bioclimáticas e topográficas (CAMPOS, 2009). Na Amazônia, essas condições tornam-se ainda mais pronunciadas devido a fatores como nível de água subterrânea próximo à superfície, as inundações periódicas que ocorrem na região anualmente e ao transporte de sedimentos que limitam a evolução do solo (Lima, 2001), levando à existência de solos jovens e, em alguns casos, também sedimentos nos estágios iniciais de formação do solo. As principais classes de solos da região, segundo Embrapa (1999), são organizadas em dois grandes domínios presentes na área de estudos: solos de terra firme e solos de várzea.

Do ponto de vista pedológico, os solos de terra firme são formados por duas importantes unidades. Os Latossolos representam cerca 34% do território de terra firme, e os Argissolos cobrem 46% da área. Os restantes 20% representam as seguintes classes: Laterita Hidromórfica, Planossolos, Cambissolos, Neossolos, Hidromórfico gleyzado, Líticos, Concrecionários, Lateritas indiscriminadas, Afloramentos rochosos e Gley pouco Húmico (Figura 5).

entre 3,5 e 5,5, baixa fertilidade natural, alta saturação por alumínio, além de teores muito reduzidos de bases trocáveis e fósforo (CAMPOS, 2009). Os Latossolos são encontrados predominantemente em relevo plano ou suave ondulado, embora ocorram também em relevo movimentado (CAMPOS, 2009).

Os **Argissolos** Amarelos ou Vermelho-Amarelo representam 41% dos solos encontrados na região. Estes solos têm granulometria predominante de argila, são profundos, possuem baixa fertilidade natural e alta saturação por alumínio. Além disso, estão normalmente associados a relevo ondulado ou fortemente ondulado. Os Argissolos são suscetíveis aos processos de erosão hídrica. Suas características químicas são muito variáveis. Nas partes centrais e oeste do Amazonas esses solos são desenvolvidos por sedimentos dos períodos Cretáceo e Cenozóico, distróficos, são ácidos e apresentam reduzida drenagem interna (EMBRAPA, 1999), que gera o aparecimento de um horizonte com caráter plíntico, resultante de processos de oxidação e redução do ferro devido à variação da aeração causada por encharcamentos temporários.

Os **Plintossolos** ocorrem em 6,5% da região, e são formados a partir dos sedimentos Holocênicos, constituídos por aluviões dispostos em terraços fluviais. Estes solos apresentam horizonte plíntico a 40 cm de profundidade, cor clara, drenagem deficiente e com predisposição à erosão nos horizontes superficiais quando utilizados. Os valores de pH são ácidos, variando de 4,0 a 5,7, com alta saturação por alumínio e baixa fertilidade natural.

Nas áreas inundáveis ocorrem **Gleissolos**, que abrangem uma área de aproximadamente 3,5% da região. Caracterizam-se pela cor acinzentada, azulada e esverdeada, com lençol freático permanente ou temporário e com aeração inadequada, resultando na redução de ferro e manganês, com pH ácido e alta saturação por alumínio.

Os **Espodossolos** ocupam 2,5% dos solos da região, ocorrendo nas áreas de acumulações inundáveis; caracterizados pela presença de horizontes A+E espessos, evidenciando perdas de matéria orgânica com ferro e/ou alumínio. Apresentam cor bastante pálida e transitam para um horizonte de acúmulo de húmus (Bh), com ou sem ferro e alumínio iluviais (Bhs) revestindo partículas de areia ou silte, podendo frequentemente aglutinar e cimentar este horizonte (BRASIL, 1978).

Os **Neossolos** representam uma área de aproximadamente 6,5%, da área total de solos da região, diferenciando-se nas quatro sub-ordens: Litólicos, normalmente

associados a relevos escarpados e afloramentos de rochas; Flúvicos, que ocorre nos ambientes aluviais; Regolíticos, que ocorrem normalmente nas proximidades dos Litólicos, porém apresentando maior desenvolvimento e terreno mais estável (com contato lítico maior de 50 cm e horizonte A sobrejacente a horizonte C ou Cr); e Quartzareníticos, que ocorrem em ambientes com depósitos de areia, nas proximidades do rios, com textura areia ou areia-franca (CAMPOS, 2009).

Com base em recorte feito no mapa utilizado na Figura 5, foi possível identificar o tipo de solo da área pesquisada (Figura 6), elaborado tendo como base o levantamento pedológico realizado pela Embrapa (1999) disponibilizado pelo IBGE (2020), com as classes atualizadas. Verifica-se que ocorrem na área solos pedologicamente desenvolvidos, caracterizados por apresentarem horizontes superiores com alteração pronunciada dos minerais originais e desenvolvimento pedogenético bastante influenciado pelas condições climáticas da região. O Latossolos Amarelo, LAd14, é um exemplo disso, sendo dominante na área (Figura 6). Um outro tipo de solo que está relacionado à área do estudo é o Gleissolo (Gleissolo, Gleissolo Húmico e Neossolo), que é característico de áreas de várzea, geralmente alagadas por quase meio ano, em cotas que variam de 0 a 30 m. Geralmente, esses solos são ricos em nutrientes como Ca, P, Mg e K, e são constantemente renovados e desenvolvidos sobre sedimentos holocênicos, siltosos e arenosos recentemente depositados (CAMPOS, 2009).

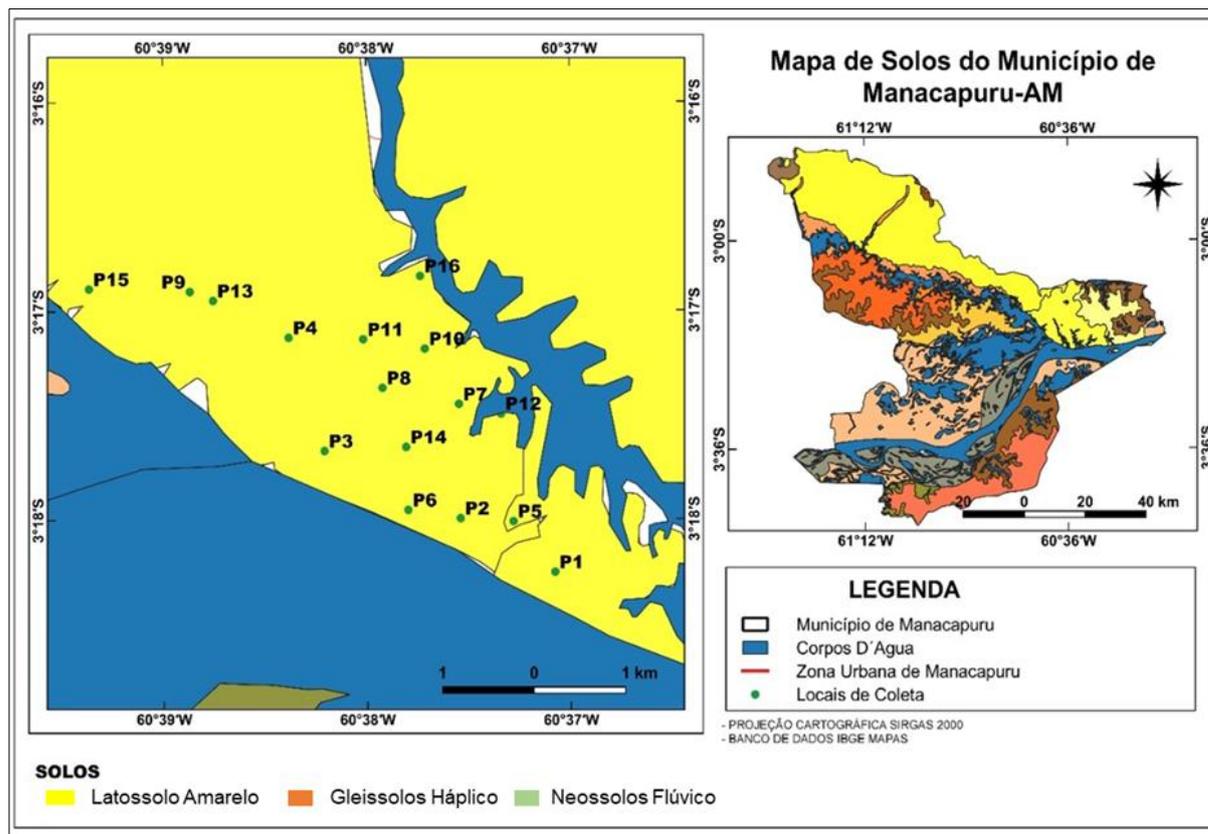


Figura 6: Tipos de solos na área de estudo, município de Manacapuru-AM. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos: P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 - Morada do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 – Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 - União; P12 – São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo (IBGE, 2020).

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1 Granulometria por difração a laser

O analisador de tamanho de partículas a laser é composto por unidade óptica (usada para coletar os dados obtidos durante o processo de medida do tamanho partícula), por uma unidade de preparação de amostras (assessora na preparação da amostra) e por um computador (opera com um Software comandando as operações do sistema de medições). É formado por sistema de lentes duplas capazes de detectar o padrão de difração a laser passante pela célula frente e retorno (reverso). A unidade óptica é constituída de três partes: o transmissor contém o dispositivo de geração do feixe que é usado para realizar as medições nas amostras, a unidade de área da amostra que fica entre o transmissor e o receptor, sendo o local onde a amostra passa em frente ao feixe do laser que gera as medidas e o receptor que registra e armazena as informações recebidas pelo espalhamento do feixe de laser que passa pela amostra, enviando-as imediatamente para o sistema do computador para serem analisadas (BARBOSA, 2013).

Segundo Lima et al. (2011) o programa do granulômetro determina a quantidade correta da concentração pela medição da quantidade de luz do laser que foi perdida ao passar pela amostra. Isso é conhecido como “obscuração” e é dado em porcentagem. A faixa de obscuração aceitável para o ensaio é aquela que vai de 10 a 30%. A amostra deve ser acrescentada ao sistema até que se tenha uma obscuração aceitável dentro da faixa acima citada. Nos ensaios realizados, a quantidade de 5 g de sedimento já era suficiente para ser atingida essa faixa. Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios no granulômetro a laser serão descritos a seguir. Primeiramente, é colocado o sedimento, aplicando o bombeamento e a agitação, então faz-se a leitura no computador da curva granulométrica obtida, nesse caso, sem aplicação do ultrassom. Após a obtenção desse resultado, aplica-se o ultrassom na mesma amostra e deixa-o ligado por um tempo até obter uma nova curva granulométrica. Foram usados 10 segundos de ultrassom para cada amostra. Após os procedimentos no programa de computador são obtidos uma tabela e um gráfico, onde os dados são transferidos para uma planilha do programa Microsoft Excel. A Figura 7 detalha o funcionamento do granulômetro.

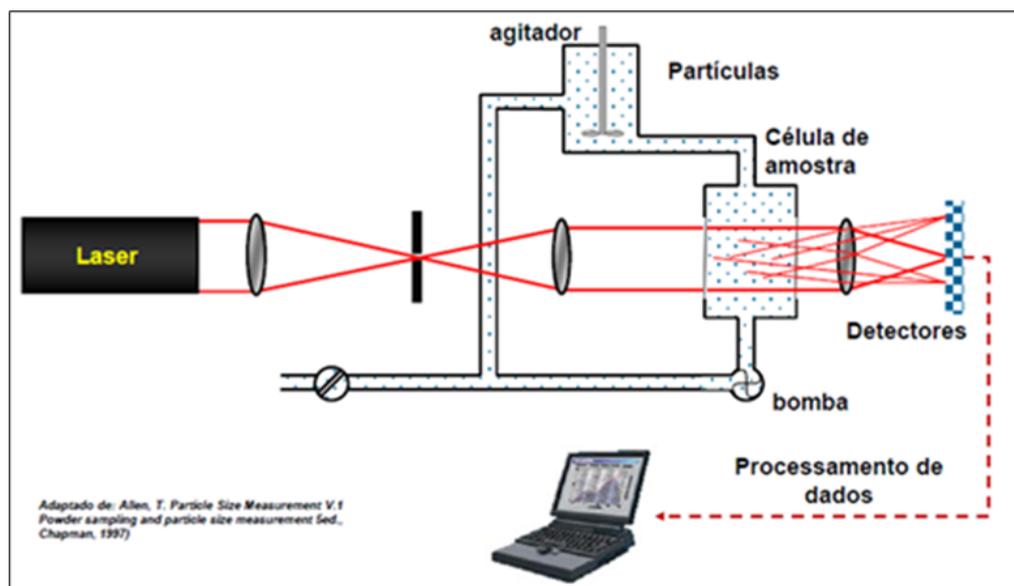


Figura 7: Esquema do funcionamento do Granulômetro a Laser.

6.2 Fluorescência de Raios X – FRX

A análise de fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica analítica amplamente utilizada para a determinação qualitativa e quantitativa da composição elementar de amostras sólidas, líquidas e em pó. A tecnologia FRX baseia-se no uso de radiação de raios X para excitar átomos em uma amostra, fazendo com que os elementos presentes na amostra emitam assinaturas de radiação. A FRX é altamente valorizada por sua capacidade de analisar uma ampla gama de elementos, desde flúor até urânio, e por ser uma técnica não destrutiva (JENKINS & DE VRIES, 1970).

A FRX envolve a emissão de raios X característicos quando uma amostra é irradiada com raios X de alta energia. Os elétrons nas camadas internas dos átomos são excitados, resultando na emissão de raios X quando esses elétrons retornam ao estado fundamental (SANTOS ET AL., 2013). Cada elemento possui uma assinatura espectral única que permite a identificação e quantificação dos elementos presentes na amostra (PANALYTICAL, 2021).

6.3 Difração de Raios X – DRX

A Difração de raios X (DRX), é uma técnica fundamental na caracterização de materiais, amplamente utilizada para determinar a estrutura cristalina, a composição e as propriedades físicas dos sólidos. A técnica de DRX baseia-se na interação dos raios X com os átomos de um cristal, resultando em padrões de difração que fornecem informações sobre a distância interplanar e a simetria da rede cristalina (CULLITY &

STOCK, 2001). Desde sua descoberta, o DRX vem sendo aplicada em diversas áreas do conhecimento tais como: ciências dos materiais, química, geologia, física entre outras áreas que requerem a análise detalhada de estruturas cristalinas.

Os princípios da técnica DRX explora o fenômeno de interferência construtiva que ocorre quando raios X, ao incidir sobre um cristal, são espalhados por seus átomos. A condição para a difração é descrita pela Lei de Bragg, que estabelece que a difração ocorre quando a diferença de caminho entre raios refletidos em planos cristalográficos diferentes é um múltiplo inteiro do comprimento de onda dos raios X (Bragg & Bragg, 1913). A expressão matemática da Lei de Bragg é dada por:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

onde:

- n é o índice de difração (um número inteiro),
- λ é o comprimento de onda do raio X,
- d é a distância entre os planos cristalinos,
- θ é o ângulo de incidência.

A interpretação dos padrões de difração permite a identificação de estruturas cristalinas e a determinação de parâmetros de rede, essenciais para a compreensão da microestrutura dos materiais (KLUG & ALEXANDER, 1974). O DRX é amplamente aplicado na caracterização de materiais geológicos, cerâmicos, metálicos e poliméricos. Na geociência, é utilizado para identificar minerais e investigar a composição de rochas e solos, contribuindo para a compreensão dos processos geológicos e para a exploração de recursos minerais (BISH & POST, 1989).

Embora a DRX seja uma técnica poderosa, ela apresenta algumas limitações. A resolução da difração é influenciada pela qualidade da amostra, incluindo fatores como tamanho dos grãos e imperfeições cristalinas. Além disso, a interpretação dos padrões de difração pode ser complexa, especialmente em materiais que apresentam múltiplas fases ou estrutura amorfa parcial (SMITH, 1999). Outra limitação é a dificuldade em analisar materiais com baixa cristalinidade ou que apresentam forte absorção de raios X. Nesses casos, técnicas complementares, como espectroscopia de infravermelho ou análise térmica, podem ser necessárias para uma caracterização completa (CULLITY & STOCK, 2001).

O equipamento DRX utilizado para estudo foi da marca PANalytical, modelo com Goniômetro PW 3050/60 (Theta/Theta). Este equipamento é reconhecido por apresentar excelente precisão e versatilidade na análise de amostras cristalinas, é composto por uma fonte de raios X, um goniômetro, um detector e um sistema de controle. A fonte de raios X gera feixes de alta intensidade, enquanto o goniômetro é responsável por posicionar a amostra e medir os ângulos de incidência e difração. A qualidade dos resultados depende da precisão com que esses ângulos são medidos e do alinhamento da amostra (PECHARSKY & ZAVALIJ, 2009).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Aquisição de dados existentes na bibliografia, sites da internet e repositórios

O presente trabalho foi organizado em três etapas principais: levantamento bibliográfico, realizado em gabinete, e atividades de campo, com reconhecimento da área, seleção de pontos de coleta e a coleta de amostras efetivamente. Depois foi feita a etapa de laboratório, com geração dos dados a partir dos diferentes métodos. Por fim, foi realizada a análise e interpretação dos dados (Figura 8).

O levantamento bibliográfico gerou a aquisição da informação existente de geologia, hidrogeologia, dados de altitude SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), imagem de satélite. Além de publicações científicas, foram utilizados mapas temáticos, dados de poços de monitoramento da Rede Brasileira de Vigilância da Fluoretação da Água Rede Vigifluor (2020), acerca da fluoretação das águas de Manacapuru-AM, dados de perfis pedológicos, geológicos e dados construtivos de poços cadastrados na plataforma SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, mantido de forma *online* pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2020).

Empresas e órgãos governamentais forneceram dados litológicos, hidrodinâmicos, hidroquímicos, de localização e construtivos dos poços, permitindo que fosse feita uma avaliação de prioridades para pontos onde seriam feitas as sondagens para coletas de amostras. Em campo, cada ponto localizado foi georreferenciado com o uso do aplicativo AVENZA SYSTEMS INC., (2023).

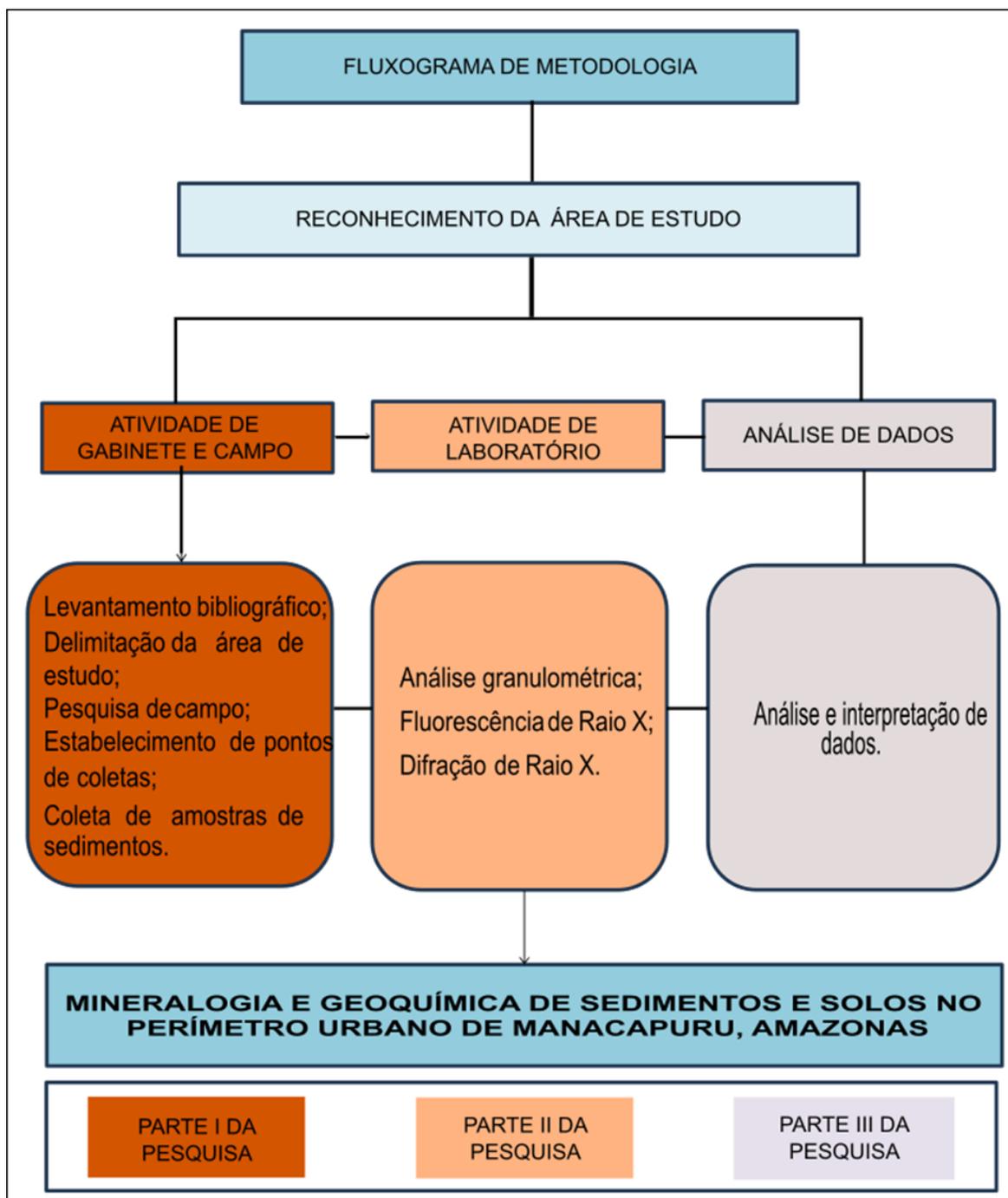


Figura 8: Fluxograma metodológico. Fonte. Nascimento, W. B.

7.2 Seleção dos pontos de coleta em campo

A seleção dos pontos de coleta em campo foi realizada com o objetivo de garantir maior representatividade e precisão dos dados obtidos para análise. Para isso, foram realizadas reuniões com a empresa responsável pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município (SAAE - Manacapuru). Nestes momentos de conversas, foi solicitado e formalizado o pedido para que a pesquisa pudesse ser

desenvolvida nos poços do SAAE. A formalização ocorreu por meio de ofícios entregues de forma presencial a empresa responsável SAAE.

Após a liberação do SAAE, feita verbalmente, iniciou-se a etapa subsequente, de definição dos pontos de coleta em campo. Esta foi feita com o auxílio de funcionários do SAAE responsáveis pela manutenção dos poços. O principal critério utilizado para seleção foi a localização, que deveria permitir uma boa distribuição de pontos na área urbana do município de Manacapuru. Para cada ponto, foram feitas anotações com as informações referentes à área na qual os poços estavam localizados, (área de difícil acesso, terreno público ou privado) condição de estrutura dos poços, distância entre os pontos definidos para coleta, topografia do terreno onde o poço estava localizado, tipo de solo e litologia. Todos os 16 pontos definidos na etapa de escritório permitiam acesso para a realização de sondagem, e foram, portanto, selecionados para este fim. A seleção dos pontos de coleta ocorreu durante o mês de outubro do ano 2021, que posteriormente foram localizados e descritos em campo.

7.3 Coleta de amostras de sedimentos com trado

7.3.1 Descrição do processo de coleta com trado

A coleta das amostras ocorreu durante o mês de novembro de 2021. O trabalho foi sempre iniciado com a limpeza da área de coleta, removendo vegetação e resíduos sólidos indesejados como lixo (Figura 9A). Para a execução da sondagem para coleta, foi utilizado o trado manual da marca Eijkelkamp, modelo TF-10/TP-3/TP-4/TU-5 com caçamba de aproximadamente 20 centímetros de comprimento e 7,5 cm de diâmetro, específicos para coleta de sedimentos arenosos e argilosos (Figura 9B).

As amostras de sedimentos foram retiradas a cada 20 centímetros de profundidade - equivalente ao tamanho da caçamba do trado como mostra a Figura 9C. O material retido na caçamba foi retirado e espalhado sobre uma lona de cor preta, e organizadas em colunas para cada metro perfurado (Figura 9D).



Figura 9: Coleta de amostras de sedimentos feita com o trado. A - Limpeza do terreno. B – Trado manual com caçamba. C - Amostras sendo retirada a cada 20 cm de profundidade. D - Sequências de amostras retiradas com trado (Fonte: Nascimento, W. B.).

A primeira amostra retirada de cada ponto, representando a profundidade de 0 a 0,2 m, foi coletada, assim como a última. A seleção das amostras restantes a serem analisadas no laboratório foi feita identificando estratos visualmente, em campo. Visando maior variabilidade das amostras representativas de estratos distintos, optou-se pela seleção de amostras que, visualmente, indicassem mudanças significativas na litologia.

As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes, etiquetadas, armazenadas em caixas de isopor. Ao todo foram coletadas pelo método de coleta com o trado, 112 amostras com profundidades que variam de 2 a 5 metros (Tabela 2).

Algumas sondagens foram feitas com distâncias inferiores a 15 m, em um mesmo terreno. Nestes casos, as informações granulométricas e estratigráficas foram unificadas, já que não foram identificadas diferenças significativas entre os pontos. A Tabela 3 apresenta o número de amostra coletadas em intervalo de profundidade, em cada um dos pontos analisados.

Tabela 2: Localização, número de amostras coletadas com trado em cada ponto, profundidade inicial e final.

Nome	Latitude	Longitude	N° de amostras	Profundidade (m)	
				Inicial	Final
Amostras de solo coletadas com trado manual (≤ 5 m)					
Correnteza	3°18'18,2"S	60°36'41,5"W	13	0,0	5,0
Padres	3°17'59,6"S	60°37'14,9"W	7	0,0	4,0
Terra Preta	3°17'36,3"S	60°38'03,0"W	5	0,0	2,0
Morada do Sol	3°16'57,2"S	60°38'15,6"W	5	0,0	3,0
Biri-Biri	3°18'00,7"S	60°36'56,2"W	7	0,0	4,0
IDAM	3°17'56,7"S	60°37'33,4"W	6	0,0	4,0
Atila Lins	3°17'20,2"S	60°37'15,4"W	7	0,0	4,0
São Jose	3°17'14,6"S	60°37'42,4"W	5	0,0	3,0
Novo Manacá	3°16'41,3"S	60°38'50,5"W	5	0,0	3,20
Palhinha	3°17'01,1"S	60°37'27,4"W	7	0,0	4,0
União	3°16'57,8"S	60°37'49,2"W	5	0,0	2,0
São Francisco	3°17'23,6"S	60°37'00,5"W	8	0,0	4,0
Lago Azul	3°16'44,4"S	60°38'42,3"W	7	0,0	3,8
Figueirinha	3°17'35,0"S	60°37'34,1"W	12	0,0	3,20
Vale Verde	3°16'40,3"S	60°39'26,2"W	5	0,0	3,0
Divino Santo	3°16'36,0"S	60°37'29,0"W	8	0,0	3,60
Total de amostras			112		

Tabela 3: Profundidades das amostras coletadas com trado manual nas unidades geológicas do município de Manacapuru-AM, ano 2021.

Pontos	Profundidade das amostras coletadas (m)				
	≤ 1 m	> 1 m ≤ 2 m	> 2 m ≤ 3 m	> 3 m ≤ 4 m	> 4 m ≤ 5 m
Correnteza	0,0-0,2 0,2-0,4 0,4-0,6 0,8-1,0	1,0-1,2 1,6-1,8 1,8-2,0	2,0-2,2 2,4-2,6	3,0-3,2 3,8-4,0	4,0-4,2 4,8-5,0
Padres	0,0-0,2 0,8-1,0	1,0-1,2 1,6-1,8	2,6-2,8 2,8-3	3,8-4,0	-
Terra Preta	0,0-0,2 0,4-0,6 0,8-1,0	1,0-1,2 1,8-2,0	-	-	-
Morada do Sol	0,0-0,2	1,0-1,2	2,0-2,2 2,4-2,6 2,8-3,0	-	-
BiriBiri	0,0-0,2 0,4-0,6 0,8-1,0	1,4-1,6	2,4-2,6 2,8-3,0	3,8-4,0	-
IDAM	0,0-0,2 0,2-0,4	1,0-1,2 1,8-2,0	2,8-3,0	3,8-4,0	-
Átila Lins	0,0-0,2 0,2-0,4 0,6-0,8	1,0-1,2 1,4-1,6	2,0-2,2	3,8-4,0	-
São José	0,0-0,2 0,2-0,4 0,8-1,0	1,0-1,2	2,8-3,0	-	-

Tabela 3 (continuada): Profundidade das amostras coletadas com trado manual nas unidades geológicas do município de Manacapuru, AM, ano 2021.

Pontos	Profundidade das amostras coletadas em metros (m)				
	≤ 1 m	> 1 m ≤ 2 m	> 2 m ≤ 3 m	> 3 m ≤ 4 m	> 4 m ≤ 5 m
Novo Manacá	0,0-0,2 0,4-0,6	1,0-1,2	2,8-3,0	3,0-3,2	-
Palhinha	0,0-0,2 0,4-0,6	1,0-1,2 1,4-1,6	2,0-2,2 2,4-2,6	3,8-4,0	-
União	0,0-0,2 0,2-0,4 0,4-0,6 0,8-1,0	1,8-2,0	-	-	-
São Francisco	0,0-0,2 0,2-0,4 0,8-1,0	1,0-1,2	2,0-2,2 2,4-2,6	3,0-3,2 3,2-3,4	-
Lago Azul	0,0-0,2 0,6-0,8	1,4-1,6	2,2-2,4 2,6-2,8	3,0-3,2 3,6-3,8	-
Figueirinha	0,0-0,2 0,2-0,4 0,8-1,0	1,0-1,2 1,4-1,6 1,6-1,8 1,8-2,0	2,0-2,2 2,2-2,4 2,6-2,8 2,8-3,0	3,0-3,2	-
Vale Verde	0,0-0,2 0,8-1,0	1,2-1,4	2,2-2,4 2,8-3,0	-	-
Divino Santo	0,0-0,2 0,4-0,8	1,2-1,4 1,6-1,8	2,0-2,2 2,6-2,8	3,4-3,60 3,8-4,0	-

7.4 Coleta de amostras de sedimentos durante perfuração de poço tubular profundo

Durante o período de coleta de sedimento feito com o trado, foi identificado a construção de um poço artesiano que estava sendo perfurado pela empresa (HP Construções de Poços Artesianos) contratada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município (SAAE - Manacapuru). Foi solicitada autorização para que se acompanhasse a perfuração, e o acompanhamento possibilitou que fossem obtidas amostras de extratos profundos que, de outra forma, não teriam sido coletadas. A seguir é descrito o processo de perfuração de poços, e como foram executadas as coletas de amostras de sedimentos.

7.4.1 Método de perfuração de poços tubulares profundos com broca rotativa e circulação direta de lama

O método de perfuração utilizado na construção do poço foi o da sondagem rotativa com a circulação direta de lama. O método de perfuração permite realizar um furo pela ação da rotação e de peso aplicados sobre uma broca fixada na extremidade de uma coluna de hastes de perfuração. A Figura 10 ilustra o modelo esquemático da torre utilizado para construção do poço pelo método de sonda rotativa e circulação de lama. O escoamento da lama de perfuração até a ponta da broca é feito por meio da bomba de lama conectada no interior da coluna de perfuração Figura 10. Os sedimentos triturados pela ponta broca chegam até a superfície por meio do espaço que existe entre a parede do poço (furo) e a coluna de perfuração Figura 10. Em superfície, o sedimento em suspensão passa por uma canaleta que interliga os tanques de deposição, sucção e lama Figura 11. Nesse estágio, a porção mais densa dos sedimentos grossos ficam depositados no tanque de deposição e os mais finos são direcionados (através da canaleta de interligação) para o tanque de sucção por onde a bomba conduz novamente a lama até a broca de perfuração completando assim o seu ciclo.

Normalmente a lama de perfuração é composta por argilas naturais, água, e pode conter aditivos para alterar características como densidade, viscosidade e salinidade. Thomas (2001) descreve as funções essenciais que ela exerce no processo de perfuração do poço: carreamento dos sedimentos; criação de um reboco na parede do furo que, em conjunto com a pressão hidráulica criada pela sua presença

no furo, impede desmoronamentos e diminui a entrada de água do aquífero durante o trabalho. Ela também auxilia no resfriamento da broca (THOMAS *et al.*, 2001).

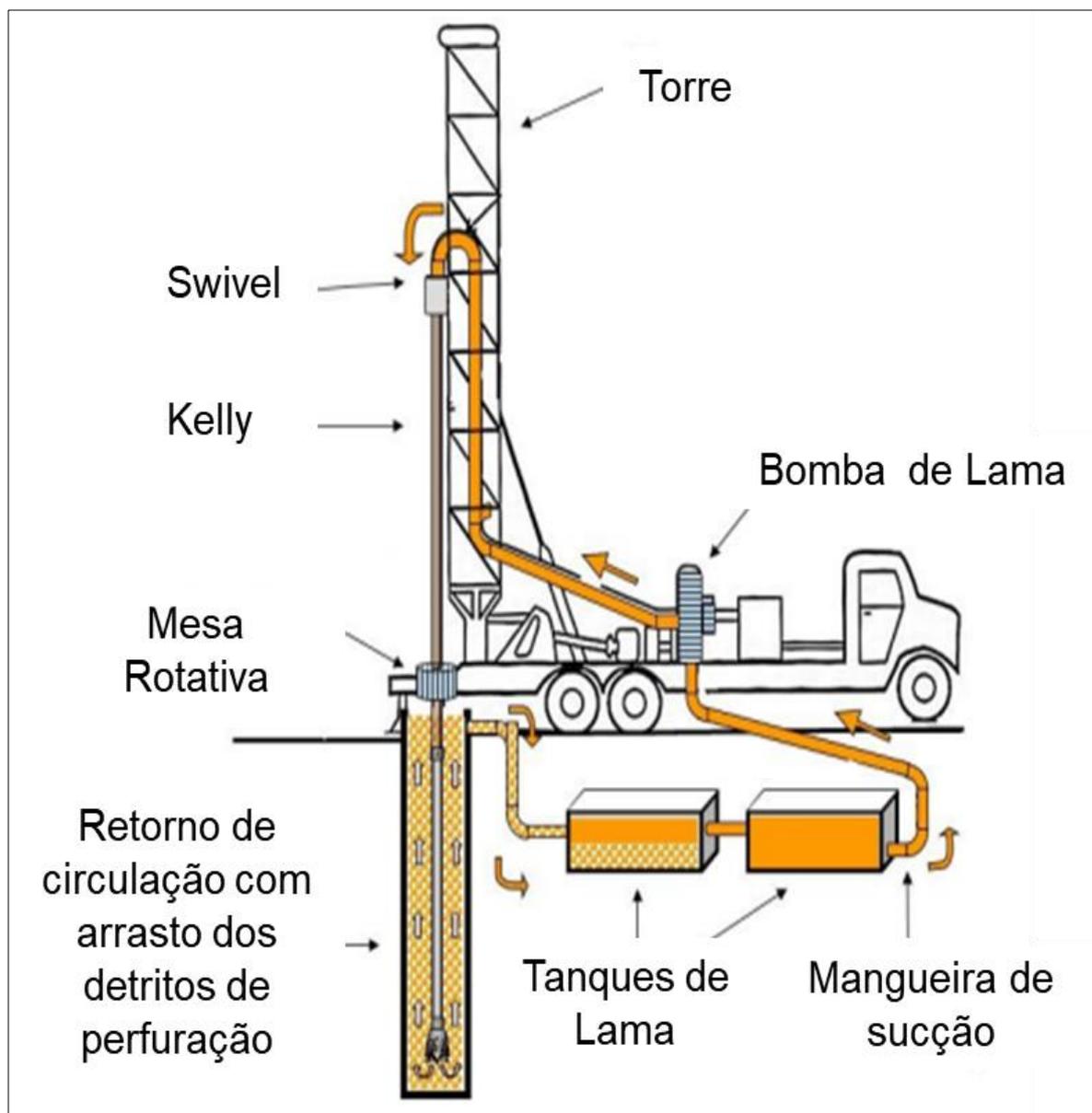


Figura 10: Sistema de Circulação da lama de perfuração. Fonte: Martins Netto (2011), modificado de Bianchi Netto (2009).



Figura 11: Canaletas que conectam os tanques de deposição e sucção da lama.

7.4.2 Coleta de amostras de sedimentos durante a perfuração do poço

A perfuração do poço tubular profundo teve início antes do consentimento para o acompanhamento e coleta de material geológico. Por isso, não foi possível a coleta de amostras nas profundidades iniciais até 57 m. No momento da coleta com o trado, não tínhamos informações sobre obras de perfuração de poços que viessem ser realizados no período em que foi feito a coleta com trado. A identificação da construção do poço ocorreu quando a empresa contratada para o serviço já havia iniciado a execução do furo, sendo coletadas apenas amostras a partir das profundidades 57 a 174 m (Tabela 4).

Na canaleta, localizada entre a broca de perfuração e o tanque de sedimentação há uma depressão onde fica depositado parte dos sedimentos carregado pelo fluxo de lama Figura 11. Neste local, o material depositado foi coletado para este trabalho. As amostras de calha chegam desagregadas à superfície, e ao serem misturadas com a lama de perfuração, acabam por alterar a granulometria dos depósitos sedimentares perfurados. As amostras foram coletadas com um recipiente plástico (garrafa de polietileno) transparente com pequenas aberturas que permitem retirar o excesso de água da amostra no momento de realização da coleta. Após a coleta, o material geológico recolhido foi acondicionado em sacos plásticos identificados com informação de profundidade de cada amostra retirada durante a perfuração.

Durante a execução da perfuração do poço tubular profundo foi possível coletar 26 amostras do material geológico (Tabela 4). Devido às condições litológicas do local onde foi realizado furo não foi possível finalizar a construção do poço, sendo encerrado na profundidade final citada na tabela 4.

Tabela 4: Amostras de sedimentos do poço união em construção no Bairro União, Manacapuru-AM.

Ponto	Latitude	Longitude	N° de amostras	Profundidade das amostras coletadas (m)						
				57	62	67	72	78	82	87
Poço União	3°16'57,8" S	60°37'49,2" W	26	93	97	101	106	110	115	120
				125	130	135	140	145	149	154
				160,0*	164	170	174	-	-	-

* Amostra com determinação precisa de profundidade por ter sido coletada a partir da ponta da broca

Para as amostras de sedimentos retiradas do Poço União, é importante destacar que a análise deste estudo não conseguiu identificar a profundidade exata em que esses sedimentos foram coletados porque há uma defasagem de tempo desde o momento em que a broca remove o material do fundo do furo e a chegada do material na superfície, que é desconhecida. Assim, quando a amostra é coletada, a broca já está em profundidade maior do que a camada de sua origem. Além disso, certamente ocorre um pouco de mistura de sedimentos de diferentes profundidades, e com a própria lama de perfuração. Argila que esteja presente na formação geológica pode ser parcialmente ou totalmente misturada na lama de perfuração. Por estas razões, apenas duas amostras as 26 coletadas foram analisadas. Ambas possuem fração argila: de 160,0 m, coletada na ponta da broca quando esta foi elevada até a superfície, o que garante tanto o conhecimento sobre sua profundidade exata, quanto a integridade da amostra, e a de 174 m, que foi coletada na calha do tanque de circulação de lama, não tendo precisão quanto à profundidade de coleta, mas como se tratava de um pedaço de argila compacta, tem integridade de composição, sem mistura com a lama de perfuração. Ambas amostras também foram utilizadas no trabalho de Silva (2022), que investigou as correlações geoquímicas entre o flúor encontrado na água, no solo e nos sedimentos da área urbana do município Manacapuru, em poços profundos de abastecimento de água.

7.5 Tratamento e análises das amostras em laboratório

7.5.1 Preparação de amostras

Inicialmente as amostras foram secas ao ar livre (Figura 12 A). Em seguida foram destorroadas com auxílio de um pistilo e almofariz de ágata (Figura 12 B). Após o destorroamento foram pesados 100 g do material em um Becker de vidro de 500 ml (Figura 12 C), e peneiradas. O peneiramento foi feito com agitador eletromagnético de peneiras redondas, da marca Bertel, modelo Inox 8x2". Cada amostra ficou por 10 minutos no agitador eletromagnético, tempo considerado suficiente para gerar alta probabilidade de passagem das partículas do material pela peneira (ao todo foram peneiradas 138 amostras). Após o peneiramento mecânico o material retido na peneira foi pesado, identificado e armazenado em sacos plástico, cada alíquota foi separada de acordo com sua finalidade.

Para a análise de granulometria no granulômetro a laser, o limite superior de a ser utilizado é de 1 mm. Como nenhuma das amostras teve grãos de tamanho superior a 1 mm, a quantidade total de todas as amostras pode ser analisada por este método cuja faixa de leitura, de 0,1 μm a 1000 μm , ou 10^{-5} a 1 mm.

As análises de Fluorescências de Raios X e Difração de Raios X foram realizadas com apenas dezesseis amostras selecionadas, peneiradas de modo a excluir todas as frações de areia, analisando apenas silte e argila. Para tanto, foi utilizada a peneira de 400 Mesh, ou < 0,038 mm de abertura (Figura 12 D). Este procedimento foi adotado porque FRX é uma técnica muito sensível a partículas finas e pode detectar elementos em concentrações muito baixas. Para o DRX a explicação é que as partículas de tamanho muito pequeno podem ter cristalitos de dimensões nanométricas, cuja análise requer uma amostra homogênea. Para este trabalho especificamente, a granulometria utilizada foi para eliminar ao máximo a sílica das amostras e tentar assim garantir que os picos do difratograma não ficassem saturados, permitindo que outros minerais além de sílica fossem identificados, mesmo que em baixas concentrações.

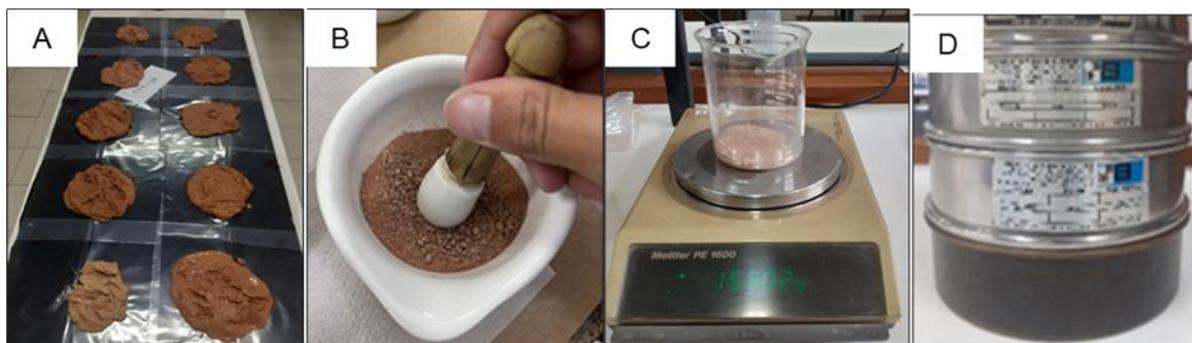


Figura 12: Preparação das amostras para análise, granulométrica, mineralógica e químicas dos sedimentos.

7.5.2 Análise granulométrica por difração a laser

A análise da distribuição do tamanho de partículas foi realizada no Laboratório de Análises Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), utilizando um granulômetro a laser da marca Bettersizer, modelo ST – Particle Size Analysis Report, conforme ilustrado na Figura 13. De acordo com o manual do Bettersizer ST (2020), o equipamento possui uma faixa de leitura que abrange partículas com tamanhos variando de 0,1 μm (micrômetros) até 1000 μm . Essa ampla faixa granulométrica permite a análise tanto de partículas ultrafinas quanto de partículas maiores, garantindo uma caracterização completa do material analisado.



Figura 13: Granulômetro a Laser Bettersizer ST – *Particle Size Analysis Report*.

7.5.3 Análise por Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição química das amostras foi determinada pela técnica de fluorescência de raios X utilizando equipamento PANalytical, modelo Epsilon 3-X, tensão máxima 50 KV, corrente máxima 3 mA, com gás de hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²). A análise Fluorescência de Raios X, foi realizada no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM).

7.5.4 Análise por Difração de Raios X (DRX)

A identificação dos minerais presentes nas 16 amostras foi realizada utilizando um Difratorômetro de raios X, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), fabricado pela PANalytical. O equipamento está equipado com um Goniômetro PW 3050/60 no modo Theta/Theta, o que permite uma medição precisa dos ângulos de difração. A fonte de raios X utilizada é um tubo cerâmico com ânodo de cobre (Cu), que emite radiação com comprimento de onda de 1,5406 Å (K α 1). Esse tubo tem uma potência de 2200W e opera em uma voltagem de até 60kV.

O detector usado foi do tipo RTMS, Pixcel/1D que captura os raios X difratados pelas amostras, permitindo uma leitura rápida e precisa das intensidades de difração. A identificação dos minerais foi feita pela comparação do difratograma obtido com padrões (fichas do banco de dados do ICDD-PDF (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File). Para cada amostra foi apresentado um difratograma, com seus principais minerais identificados. Os minerais identificados foram designados em ordem decrescente de concentração, de acordo com a predominância na amostra dos picos individuais de cada mineral representados por barras coloridas sobrepostas ao difratograma. As análises foram realizadas pelo laboratório de Análises Minerais (LAMIN) do Serviço Geológico do Brasil (SGB), em Manaus.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões referente a este trabalho serão apresentados na forma de manuscrito, que foi submetido ao periódico Geologia USP – Série Científica, no dia 26/12/2024, intitulado:

Mineralogia e geoquímica de sedimentos e solos no perímetro urbano de Manacapuru, Amazonas

Mineralogy and geochemistry of sediments and soils in the urban area of Manacapuru, Amazonas

¹ Willian Barros do Nascimento; ² Ingo Daniel Wahnfried; ³ Jefter Haad Ruiz da Silva; ⁴ Keila Cristina Pereira Aniceto; ⁵ Milton César Costa Campos

1 Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Av. Gen. Rodrigo Octávio Jordão Ramos, 6.200 - Bairro Coroado 69.080-900 - Manaus, Amazonas, Brasil, e-mail: willianbarros18@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8164-6246>

2 Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil, e-mail: iwahnfried@ufam.edu.br, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3427-9447>

3 Universidade Federal do Amazonas, Mestre em Odontologia, Manaus, Brasil, e-mail: jefterhaad@hotmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1322-640X>

4 Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, Brasil, e-mail:

keilaniceto@ufam.edu.br, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8258-1328>

5 Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Solos e Engenharia Rural, Paraíba, Brasil, e-mail: mcesarsolos@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8183-7069>

Resumo

Na região norte, 57% das sedes municipais utilizam aquíferos como fonte única de abastecimento, enquanto 13% combinam aquíferos e águas superficiais para obter sua água. A importância dos aquíferos se deve à boa qualidade e acessibilidade da água, especialmente em períodos de estiagem. Contudo, seu uso sem avaliação adequada pode expor a população a contaminações naturais. O presente trabalho caracterizou os sedimentos de superfície e subsuperfície das unidades geológicas da área urbana de Manacapuru/AM, visando identificar elementos que possam impactar a qualidade da água subterrânea. Foram amostrados 16 pontos próximos a poços tubulares, com furos de sondagem a trado atingindo 2 a 5 m de profundidade. As amostras foram coletadas a cada metro ou quando havia mudanças significativas na litologia. No ponto P11-União, também foram coletados sedimentos até 174 m, durante a perfuração de um poço tubular profundo. No total, 138 amostras foram selecionadas para análise granulométrica, sendo 16 submetidas a análises de fluorescência e difração de raios X. Os resultados revelaram perfis estratigráficos com camadas intercaladas de areia, silte e argila. A análise química identificou dez óxidos, com predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . A mineralogia apontou a presença de quartzo, caulinita, goethita, gibbsita, hematita, rutilo, microclínio e nontronita. Embora trabalhos anteriores indiquem flúor na água subterrânea, neste estudo, traços de esmectita e vermiculita, minerais potencialmente associados ao flúor, foram encontrados apenas no ponto Poço União, em 160 m de profundidade. Nas amostras rasas analisadas não foram detectados minerais com flúor. A identificação de esmectita e vermiculita na região sugere a necessidade de investigação aprofundada desses minerais devido à possível presença de flúor.

Palavras chaves: Mineralogia; Geoquímica de sedimentos; Solos; Águas subterrâneas.

Abstract

In the northern region of Brazil, 57% of the cities rely on aquifers for water supply, while 13% combine aquifers and surface water sources. Aquifers are preferred due to the good quality and accessibility of their water resources, especially during drought periods. However, their use without proper evaluation may expose populations to natural groundwater contamination. This study characterized the surface and subsurface sediments of geological units in the urban area of Manacapuru, State of Amazonas, to identify elements that could impact groundwater quality. Sixteen sampling points near tubular wells were selected, with auger drilling reaching depths of 2 to 5 meters. Samples were collected every meter or when significant lithological changes were observed. At point P11-União, sediments were also collected down to 174 meters during the drilling of a deep tubular well. A total of 138 samples were selected for granulometric analysis, and 16 samples underwent X-ray fluorescence and diffraction analyses. The results revealed stratigraphic profiles with interbedded layers of sand, silt, and clay. Chemical analysis identified ten oxides, predominantly SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 . Mineralogical analysis showed the presence of quartz, kaolinite, goethite, gibbsite, hematite, rutile, microcline, and nontronite. Although previous studies indicated the presence of fluoride in groundwater, this study found traces of smectite and vermiculite minerals potentially associated with fluoride only at point Poço União at a depth of 160 meters. No fluoride-containing minerals were detected in the shallow samples analyzed. The identification of smectite and vermiculite in the region highlights the need for further investigation of these minerals due to their potential fluoride content.

Keywords: Mineralogy; Sediment Geochemistry; Soils; Groundwater

INTRODUÇÃO

O Estado do Amazonas possui população estimada de pouco mais de 4.281.000 de habitantes (IBGE, 2024), a maioria concentrada ao longo das margens dos mais de 25 mil quilômetros de águas navegáveis. Apesar da rica disponibilidade hídrica em superfície, 57% das sedes municipais utilizam aquíferos como fonte única de abastecimento, enquanto 13% usam tanto os rios como aquíferos (ANA, 2021). As principais razões para a preferência por aquíferos são a boa qualidade intrínseca que a água subterrânea predominantemente possui, e sua acessibilidade em qualquer área com aquíferos freáticos, já que a alta taxa de precipitação gera níveis de água rasos, logo, acessíveis.

Apesar da água subterrânea ser amplamente utilizada e ter boa qualidade intrínseca, sua composição química pode ser influenciada pela interação com os solos e sedimentos, o que pode alterar suas propriedades e, em alguns casos, comprometer a sua qualidade. A interação da água subterrânea com o meio ao seu redor influencia na sua composição, definindo as características químicas que possui. Há situações específicas em que as características químicas da água geradas por essa interação podem ser prejudiciais à saúde. Exemplos de trabalhos que identificaram estas situações são De Meyer et al. (2023), que detectaram níveis elevados de arsênio e manganês em aquíferos freáticos situados em sedimentos recentes da Amazônia brasileira e peruana, evidenciando um significativo risco de contaminação geogênica na região; Ribeiro et al. (2024) e Fernandes Neto e Wahnfried (2024) constataram contaminações de origem tanto geogênica quanto antrópica em águas subterrâneas de Novo Airão e da Bacia do Alto Rio Negro, com concentrações de arsênio, manganês e ferro superiores aos valores recomendados para qualidade da água.

Esse impacto da interação entre a água e os sedimentos é ainda mais relevante quando consideramos as características específicas dos sedimentos e rochas na região de Manacapuru. Em águas subterrâneas, são as características de superfície e subsuperfície, como os sedimentos e rochas, que vão determinar sua composição. No contexto local, a mineralogia juntamente com a química dos solos e sedimentos exerce grande influência na qualidade da água subterrânea do município de Manacapuru, controlando os processos de dissolução, adsorção e troca catiônica.

A presença dos latossolos na área de estudos contribui para os altos teores de óxidos de ferro, alumínio e taxas elevadas de matéria orgânica (SANTOS ET AL.,

2013). Essas características minerais desempenham um papel fundamental na capacidade de troca catiônica, na retenção de nutrientes e na solubilização de compostos, que afetam a química dos corpos d'água locais (LIMA et al., 2017).

A acidez dos solos da área de estudo, intensificada pela presença de ácidos orgânicos liberados durante a decomposição da vegetação, reduz o pH da água subterrânea, favorecendo processos geoquímicos como a dissolução de minerais. Esse ambiente ácido facilita a mobilização e a liberação de íons metálicos, como Al^{3+} e Fe^{2+} , que podem ser transportados para o aquífero (OLIVEIRA et al., 2015). Segundo a portaria 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), a presença elevada desses elementos na água subterrânea não representa um risco à saúde, mas altera os padrões organolépticos da água, impactando sua aceitação pela população.

Apesar da relevância dos sedimentos na qualidade da água subterrânea, poucos estudos se aprofundaram nas características mineralógicas dos sedimentos urbanos de Manacapuru, especialmente em relação à presença de elementos contaminantes que possam afetar os recursos hídricos da região.

Embora existam alguns trabalhos nesta área, como Matheus (2017), Fernandes Neto (2024), Pita et al. (2018), Rede Vigiflúor (2020) e Meyer et al. (2023), em relação à presença de alumínio, arsênio, ferro e manganês em águas subterrâneas de poços rasos e profundos em Careiro Várzea, ao longo dos rios Solimões, Manacapuru, Madeira e da BR-319, poucos estudos têm sido propostos para estudar as características mineralógicas destes sedimentos na área.

Portanto, o objetivo deste estudo é caracterizar os sedimentos de superfície e subsuperfície das unidades geológicas da área urbana do município de Manacapuru, com o intuito de verificar a existência de elementos que possam contaminar a água subterrânea.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo compreende o perímetro urbano municipal da cidade de Manacapuru, localizado ao oeste do estado do Amazonas, na margem esquerda do rio Solimões na confluência com o rio Manacapuru.

Dados pluviométricos de Manacapuru indicam precipitação média anual de 2.190 mm, com maior precipitação entre os meses de dezembro e maio. A

temperatura média anual varia entre 22,0 e 31,7°C, e a umidade relativa do ar varia entre 77% a 84% (D'ANTONA et al, 2007). Segundo o mapa atualizado de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), Manacapuru pertence à categoria Af, de clima equatorial, com médias mensais de precipitação bem acima de 60 mm e dos 18 °C que definem esta classe climática.

Na área aflora a Formação Alter do Chão (Figura 14), caracterizada por sedimentos de origem continental, depositados em ambiente fluvial e lacustre durante o período Cretáceo. A formação associada é composta por depósitos de arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados, que se acumularam durante o Neocretáceo (CUNHA et al., 1994).

A configuração geomorfológica da região de Manacapuru é caracterizada pela presença de duas importantes unidades. Os platôs dissecados formados pelas superfícies tabulares e colinosas, separados por encostas com diferentes níveis topográficos, representados pelas áreas de terra firme composta por rochas da Formação Alter do Chão, que em geral, são intemperizadas e lateritizadas (D'ANTONA et al., 2007). Planícies fluviais de acumulação que exibem superfícies planas, aptos ao acúmulo de sedimento fluvial periódico ou permanentes. São áreas sazonalmente inundáveis, representadas por planícies aluvionares ou várzeas, comportando diques marginais em processos de colmatagem, canais anastomosados, lagos, paranás, igarapés, igapós e ilhas. As áreas de várzeas são formadas pelo depósito de sedimentos recentes transportados pelos rios que se alagam durante as enchentes.

Foram selecionados dezesseis pontos para amostragem, todos localizados próximos a poços tubulares da cidade de Manacapuru (Figura 15). Em seguida, foram abertos furos de sondagem, cuja profundidade variou entre 2 e 5 metros. Nestes pontos, foram coletadas amostras de sedimento, em intervalos de 0,20 metros, e selecionadas para análises de acordo com a mudança visualmente percebida na litologia.

Além das amostras coletas com trado, foi realizada coleta de amostras de extratos profundos de poço que estava sendo perfurado quando a coleta com trado. Um total de 138 amostras foram coletadas, destas, 112 foram feitas com trado e 26 da perfuração do PP- Poço profundo, que utilizou método de sondagem broca rotativa com circulação direta de lama.

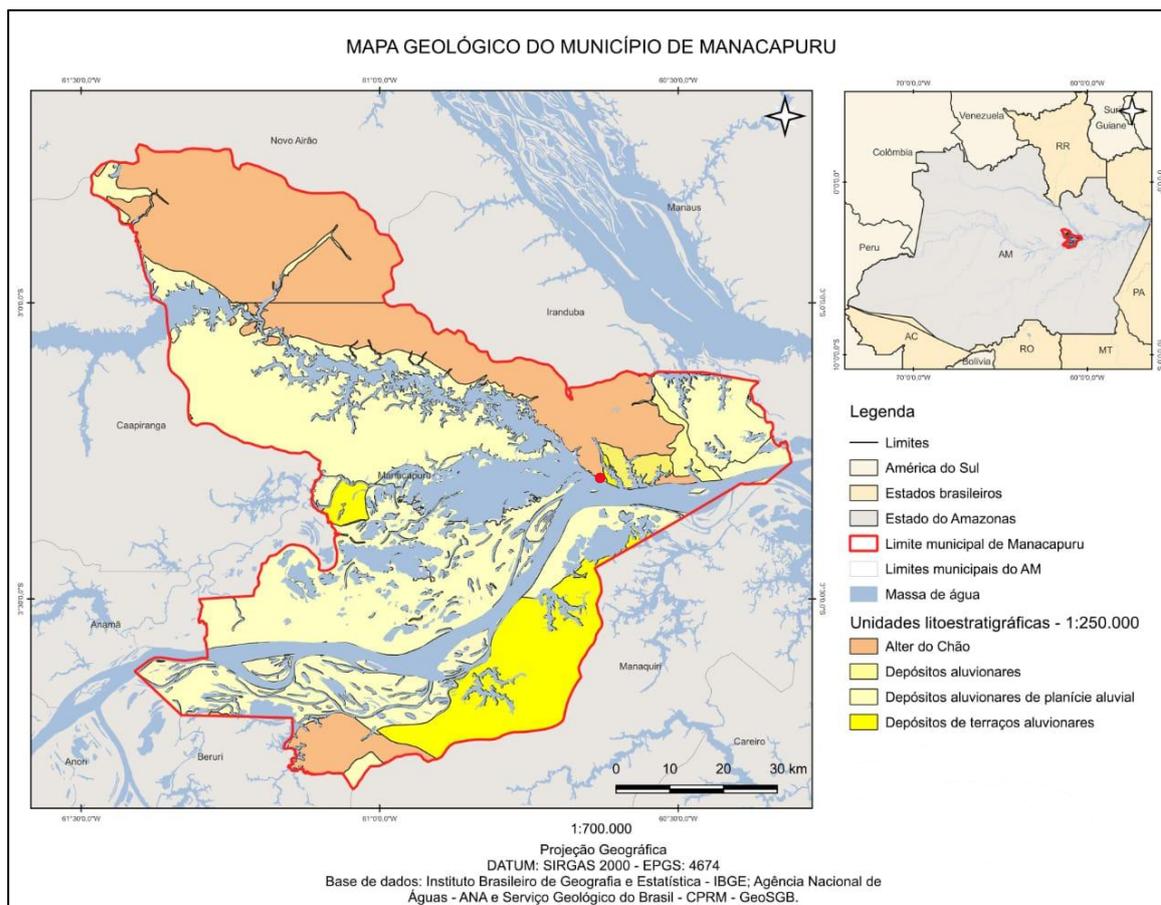


Figura 14: Geologia do município de Manacapuru, Amazonas. (IBGE, (2020); SERVIÇO GEOLOGICO DO BRASIL - CPRM, (2020).

As amostras de sedimentos foram secas ao ar livre, desagregadas com auxílio de um pistilo e almofariz de ágata e pesadas. A obtenção da granulometria para análises físicas, químicas e mineralógica ocorreu pelo peneiramento das amostras através de agitador eletromagnético de peneiras redondas, da marca Bertel, modelo Inox 8x2". Cada amostra ficou por 10 minutos no agitador eletromagnético, para garantir a passagem das partículas do material pela peneira. Após o peneiramento, o material foi pesado identificado e armazenado em sacos plástico, onde cada alíquota foi separada para suas devidas finalidades.

Todas as 138 amostras foram submetidas a análise granulométrica. Para a análise de granulometria no granulômetro a laser, cuja faixa de leitura é de 0,1 μm a 1000 μm , ou 10^{-5} a 1 mm. Como durante o peneiramento nenhuma das amostras teve grãos de tamanho superior a 1 mm detectados, a quantidade total de todas as amostras pode ser analisada utilizando o granulômetro a laser. O equipamento utilizado é da marca Battersizer ST – *Particle Size Analysis Report*, (BATTERSIZER,

2020). O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

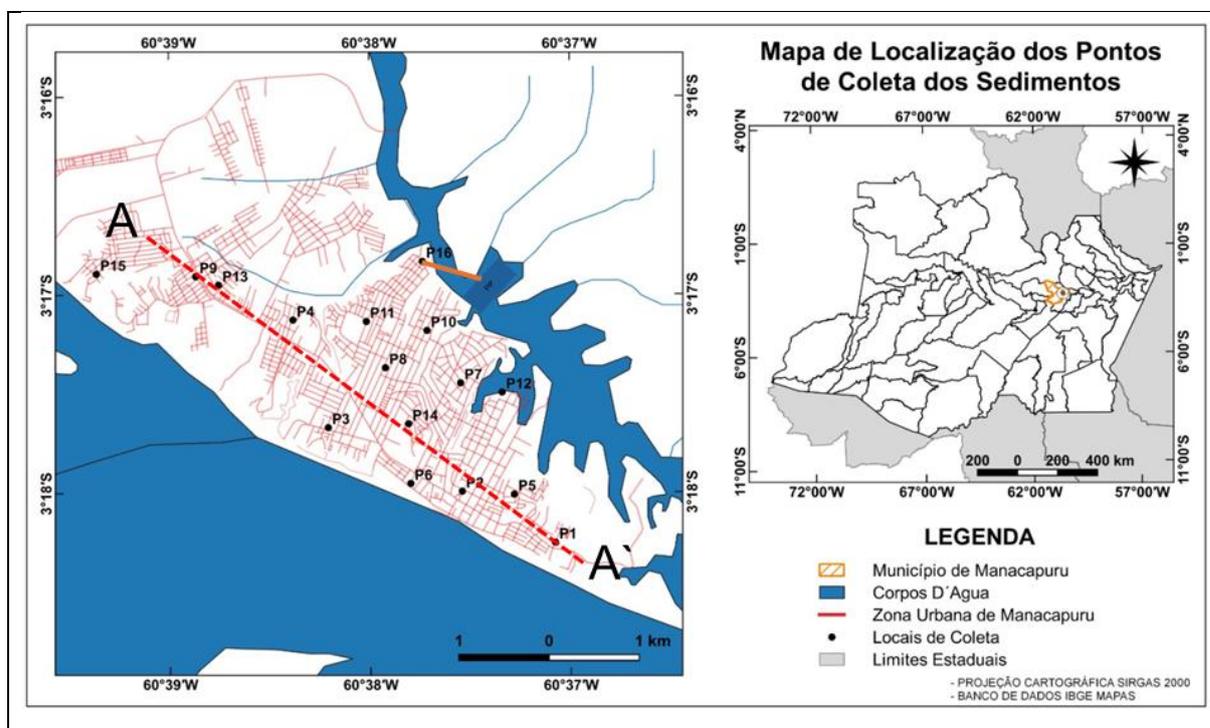


Figura 15: Mapa de localização da área de estudo, com a indicação dos pontos distribuídos ao longo do perímetro urbano. Os pontos P1 a P16 são os locais de coleta de amostras de solos e sedimentos P1 - Correnteza; P2 - Padres; P3 - Terra Preta; P4 – Mora do Sol; P5 - Biri-Biri; P6 - IDAM; P7 – Atila Lins; P8 - São Jose; P9 - Novo Manacá; P10 - Palhinha, P11 – União e PP-Poço profundas; P12 – São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo (IBGE,2020).

As análises químicas e mineralógica foram realizadas com apenas dezesseis amostras selecionadas com granulometria $< 0,038$ mm. Este procedimento foi adotado para analisar apenas as granulometrias silte e argila, e assim eliminar ao máximo o quartzo das amostras, possibilitando que outros compostos além da sílica fossem identificados, mesmo que em baixas concentrações.

A composição química das amostras foi determinada pela técnica de fluorescência de raios X utilizando equipamento PANalytical, modelo Epsilon 3-X, tensão máxima 50 KV, corrente máxima 3 mA, com gás de hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²). A análise Fluorescência de Raios X, foi realizada no Laboratório de Ensaios Físico-Químicos da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (LEM/FT/UFAM).

A identificação dos minerais foi feita pelo difratômetro de raios X. Os difratogramas foram obtidos empregando-se difratômetro modelo X'PERT PRO MPD

(PW 3040/60), da PANalytical, com Goniômetro PW 3050/60 (Theta/Theta) e com tubo de raios X cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_{1,2}$, 1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kv. O detector utilizado foi do tipo RTMS, Pixcel/1D em amostras totais. As análises foram realizadas pelo laboratório de Análises Mineraias – LAMIN do Serviço Geológico do Brasil - SGB - Manaus.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Granulometria

Os perfis analisados em forma de seções vertical permitiram uma visão completa da sequência sedimentar. Os perfis amostrados apresentam de 2 a 5 m de espessura, que são representados por intercalações de camadas de arenitos e pelitos que, por vezes, definem tendência granocrescente ascendente. Os arenitos são quartzosos e feldspáticos, exibem granulometria fina a média, com aspecto maciço e estratificações plano-paralela e cruzada, enquanto os pelitos são maciços ou laminados (FRANCO et al., 2024). Nas figuras 16 e 17 é apresentada a distribuição vertical das partículas em superfície e subsuperfície de cada um dos pontos. Há predomínio de areia, com intercalações de silte e argila que indica flutuações de energias, e possíveis sobreposição de eventos deposicional na área de estudo. De modo geral, a fração dominante é constituída por areia, com diferentes padrões de deposição, típicos da Formação Alter do Chão (MOREIRA; GURGEL, 2018).

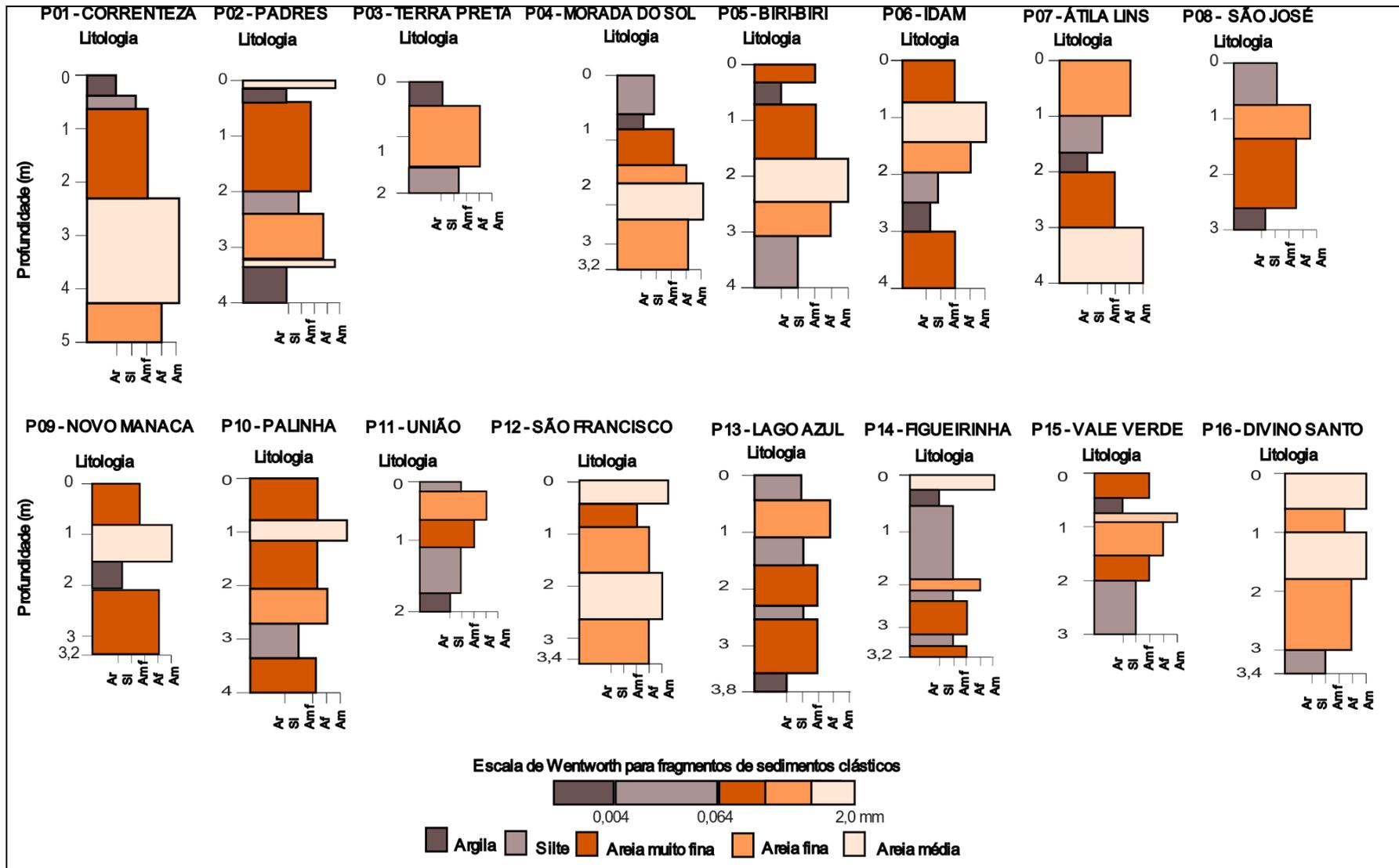


Figura 16: Distribuição do tamanho de partículas de amostras de sedimento coletadas no perímetro urbano municipal da cidade de Manacapuru, Amazonas.

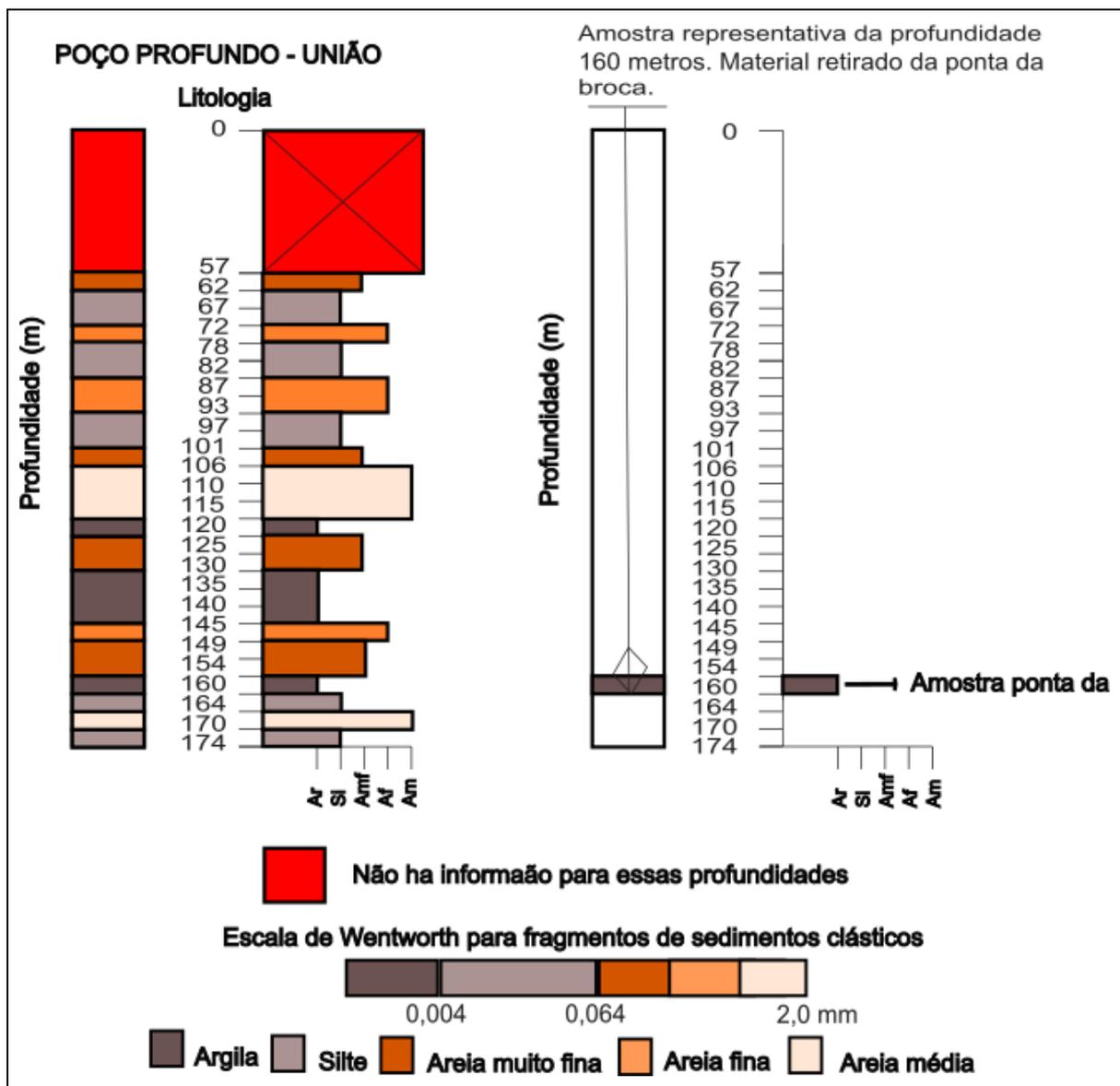


Figura 17: Distribuição do tamanho de partículas de amostras de sedimento coletadas do poço profundo situado no perímetro urbano municipal da cidade de Manacapuru, Amazonas.

Mineralogia dos sedimentos

Os resultados da mineralogia são apresentados na Tabela 5. O quartzo e caulinita são os argilominerais com maior predominância, tendo sido identificados em todas as 16 amostras analisadas. Além destas amostras, estes dois argilominerais também aparecem nas duas amostras, profundas, coletadas dos pontos PP – Ponto Profundo (a 174 m de profundidade), assim como no ponto Ponta da Broca (a 160 m de profundidade).

Em menores proporções, foram encontrados goethita (P2 – Padres, P4 – Morada do Sol, P6 – IDAM, P8 – São José, P9 – Novo Manacá, P11 – União, P13 –

Lago Azul, P14 – Figueirinha, P15 – Vale Verde), gibbsita (P2 – Padres, P4 – Morada do Sol, P6 – IDAM, P7 – Atila Lins e P15 – Vale Verde), e hematita (P1 – Correnteza, P5 – Biribiri, e P15 – Vale Verde). O rutilo foi identificado em uma única amostra (P10 – Palhinha), assim como a nontronita em amostras de estrado profundo do PP – Poço Profundo. Microclínio foi encontrado em duas amostras em subsuperfície, na amostra coletada da ponta da broca na profundidade 160, e na amostra do PP – Poço Profundo. A abundância da caulinita e do quartzo nas amostras, pode estar relacionada às condições geológicas e ambientais em que esses minerais se formaram. A caulinita, por exemplo, pode ter sido formada a partir da alteração de minerais primários, como feldspato, em condições em que ocorreu intemperismo químico intenso. Quesada et al. (2011) descrevem os solos amazônicos como fortemente intemperizados devido à exposição prolongada a condições de alta umidade, temperatura e atividade biológica. Esses fatores promovem a lixiviação de bases e sílica, deixando minerais resistentes, como a caulinita, como produtos do intemperismo. Outras fases encontradas foram traços de hematita (pontos P5 – Biribiri, P1 – Correnteza e P15 – Vale Verde, rutilo P10 – Palhinha), microclínio (na amostra da ponta da broca e do PP- Poço profundo), e a nontronita (PP- Poço profundo).

A goethita, um óxido de ferro amplamente presente em solos, destaca-se como um dos principais constituintes da laterita – um tipo de solo altamente intemperizado característico da região analisada neste estudo. A gibbsita é um hidróxido de alumínio, mineral secundário, formado pelo intemperismo químico intenso especialmente em climas tropicais, a partir da lixiviação intensa de rochas ricas em feldspato e micas.

A grande quantidade de sílica presente nas amostras pode ter interferido na identificação de outras fases minerais. Isso era esperado, e para este efeito, foi feita a separação da granulometria 0,038 μm .

A relação estabelecida entre mineralogia e granulometria das 16 amostras de sedimentos é apresentada na Tabela 5. As amostras dos pontos analisados P1 a P16 possuem perfil semelhante em relação à presença de quartzo e caulinita. Estes minerais estão associados à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, tais como goethita, gibbsita e hematita, encontrado em superfície, e subsuperfície. Além dos minerais acima citados, a presença de nontronita e microclínio e rutilo. A sua presença é reflexo da origem dos sedimentos e do intenso intemperismo químico que predomina na região amazônica.

Tabela 5: Composição mineralógica das frações granulométrica das amostras superficiais e subsuperficiais da área de estudo.

Pontos	Profundidade (m)	Granulometria	Mineralogia ¹	Fórmula química
P01 – Correnteza	0,2-0,4	Areia	qz, k, he	
P02 – Padres	0,8-1,0	Areia	qz, k, go, gb	
P03 – Terra Preta	0,0-0,2	Areia	qz, k	
P04 – Morada do Sol	0,0-0,2	Argila	qz, k, go, gb	Qz = SiO ₂
P05 – Biri-Biri	0,8-1,0	Argila	qz, k, he	K = Al ₂ Si ₃ O ₅ (OH) ₄
P07 – Atila Lins	0,2-0,4	Argila	qz, k, gb	he = α-Fe ₂ O ₃
P08 – São José	1,0-1,2	Areia	qz, k, go	go = α-Fe ³⁺ O(OH)
P09 – Novo Manacá	0,0-0,2	Areia	qz, k, go	gb = Al(OH) ₃
P10 – Palhinha	0,0-0,2	Areia	qz, k, ru	ru = TiO ₂
P11 – União	0,4-0,6	Areia	qz, k, go	no = (Ca _{0,5} ,
P12 – São Francisco	2,0-2,2	Argila	qz, k	Na _{0,5}) _{0,3} Fe ³⁺² (Si,
P13 – Lago Azul	0,0-0,2	Areia	qz, k, go	Al) ₄ ⁰ ₁₀ (OH) ₂ .nH ₂ O
P14 – Figueirinha	1,4-1,6	Areia	qz, k, go	mi = KAlSi ₃ O ₈
P15 – Vale Verde	2,8-3,0	Silte	qz, go, k, he, gb	
P16 – Divino Santo	0,0-0,2	Argila	qz, k	
Ponta da Broca	160	Argila	qz, k, mi, vm, sm	
PP	174	Silte	qz, mi, k, no	

¹análises realizadas por difração de raios X. Qz – quartzo, k – caulinita, gb – gibbissita, ru – rutilo, he – hematita, go – goethita, no – nontronita e mi – microclínio e traços de vm – vermiculita e sm – esmectita.

Análise de granulometria e química dos sedimentos

A análise granulométrica revelou um padrão de distribuição com duas classes texturais: franco arenoso e franco. Os resultados mostram que, das 15 amostras analisadas, 53% (8 amostras) são classificadas como franco arenoso e 47% (7 amostras) como Franco tabela 6. Os teores de areia variam de 67% a 83% para essas amostras: P01 – Correnteza; P02 – Padres; P03 – Terra Preta; P08 – São Jose; P09 – Novo Manacá; P11 – União; P13 – Lago Azul e P14 – Figueirinha, com baixos teores de silte e argila. Por outro lado, amostras dos pontos: P04 – Morada do sol; P05 – Biribiri; P07 – Atila Lins; P10 – Palhinha; P12 – São Francisco; P15 – Vale Verde e P16 – Divino Santo, apresentam proporção equilibrada de areia, silte e argila, sendo classificadas como franco.

Na análise química foram detectados dez tipos de óxidos. As amostras apresentam semelhança, com predomínio de SiO₂ (23,71% a 65,64%), Al₂O₃ (9,14% a 38,35%) e Fe₂O₃ (1,88% a 48,06%) (Tabela 6). As amostras analisadas não apresentam diferenças quantitativamente de elementos presentes. Já a concentração de óxidos permite destacar algumas amostras.

A amostra com maior concentração de SiO_2 foi reportado no ponto P12 - São Francisco, enquanto, o menor valor ocorreu no ponto P15 – Vale Verde (Tabela 6). A maior concentração de óxido de Al_2O_3 , foi verificado no ponto P01 – Correnteza, e o menor valor no ponto P07 – Atila Lins. Esta característica estabelecida deve estar relacionada com a geologia da área, que é composta predominantemente pelos arenitos da Formação Alter do Chão, ricos em quartzo e feldspatos, em que SiO_2 e Al_2O_3 predominam. O produto do intemperismo do feldspato é o argilomineral caulinita, detectados nos difratogramas, e que possui mais de 65% de SiO_2 e 38% de Al_2O_3 em sua composição (Tabela 6).

O Fe_2O_3 foi o terceiro óxido com a maior concentração em ordem de ocorrência nas amostras. Verificou-se que o ponto P15 - Vale Verde apresenta a maior concentração de Fe_2O_3 com 48,06%, e o menor valor no ponto P12 – São Francisco, com 1,88%. O Fe_2O_3 encontrado na amostra do ponto P15 - Vale Verde, pode estar relacionado com a unidade geológica da área, que possui presença de minerais como hematita e goethita, divergindo do valor determinado para o ponto P12 – São Francisco. Esses resultados estão de acordo com os achados de Palma (2014) que, ao estudar a gênese e distribuição das silicificações dos paleossolos e das rochas sedimentares que afloram na região de Manaus, observou que, em amostras de arenito, o SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 apresentaram maiores concentrações. Essa observação pode ser relacionada com a localização dos pontos, visto que os sedimentos de cada ponto podem ter tido origens distintas, além de poderem ter sido remobilizados.

A concentração de P_2O_5 nas amostras foi menor que <0,1%, revelando a baixa fertilidade natural desses solos. O enxofre também ocorre em baixas concentrações, o que não sugere influência significativa de materiais sulfatados. Potássio (K_2O) e Cálcio (CaO) apresentaram concentrações bem reduzidas. O potássio varia entre 0,02% a 1,96%, indicando para baixa capacidade de retenção de nutrientes nos sedimentos. O cálcio varia de 0,03% a 1,75%, refletindo possível contribuição de matéria orgânica ou minerais secundários em pontos específicos.

Zircônio (Zr) e Titânio (Ti) são os elementos traços que apresentam pouca variação (Zr: 0,20% a 1,03%; Ti: 01,43% a 3,02%). Esse comportamento indica o quanto esses elementos são resistentes aos processos de intemperismo. As concentrações mais elevadas em locais com a textura arenosa indicam a preservação de minerais acessórios.

Os quartis Q_1 e Q_3 foram segmentadas de acordo com suas características granulométricas e composição química (Tabela 6). Quatro amostras ficaram abaixo do primeiro quartil (Q_1). São elas: P01 - Correnteza; P04 - Morada do Sol; P05 - Biri-Biri e P07 - Atila Lins. Essas amostras são compostas principalmente por sedimentos arenosos, apresentando baixa proporção de argila, indicando que nesses locais a capacidade desses sedimentos na retenção de água e nutrientes são bem reduzidas. Isso torna estes pontos locais relevantes para estudos sobre contaminações antrópicas de aquíferos na área. Já as quatro amostras que ficaram acima do terceiro quartil (Q_3) foram P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo.

A comparação estabelecida entre a granulometria e geoquímica permitiu uma análise clara voltada para dominância dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 nas amostras, o que indica a resistência desses minerais aos processos de intemperismo físico e químico na área, levando ao seu relativo acúmulo nos grãos, de areia.

Tabela 6: Análises granulométrica e química das amostras coletadas com trado da área de estudo: P01 - Correnteza; P02 - Padres; P03 - Terra Preta; P04 - Morada do Sol; P05 - Biri-Biri; P07 - Atila Lins; P08 - São Jose; P09 - Novo Manacá; P10 – Palhinha; P11 - União; P12 - São Francisco; P13 - Lago Azul; P14 - Figueirinha; P15 - Vale Verde; P16 - Divino Santo. As análises de granulometria foram realizadas em frações menores que 1 mm, enquanto as análises de DRX e FRX utilizaram frações menores que 0,038 mm.

Pontos	Profundidade (m)	Granulometria (%)			Classe textural ¹ SiBCS	Composição química ² (%)									
		Areia	Silte	Argila		Ag	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SO ₃	Ti	Zr
P01	0,2-0,4	73,4	13,8	12,8	Franco Arenoso	0,10	38,35	0,09	4,19	1,96	0,06	52,73	0,05	1,81	0,61
P02	0,8-1,0	83,5	1,9	14,7		0,20	31,73	0,18	23,7	0,21	0,05	41,38	0,03	2,52	-
P03	0,0-0,2	77,4	9,9	12,7		0,17	26,65	0,27	24,81	0,17	0,07	44,1	0,07	2,46	1,03
P04	0,0-0,2	63,7	16,6	19,7	Franco	0,25	27,24	0,78	27,48	0,04	0,46	39,74	0,02	3,02	0,70
P05	0,8-1,0	63,6	15,6	20,8		0,13	38,08	0,08	4,34	1,76	0,09	52,74	0,05	1,84	0,78
P07	0,2-0,4	59,7	18,1	22,3		0,14	9,14	0,6	4,38	0,16	0,05	63,78	0,05	1,43	0,20
P08	1,0-1,2	80,7	4,6	14,8	Franco Arenoso	0,18	27,1	0,05	36,5	0,12	0,09	33,17	0,09	1,81	0,62
P09	0,0-0,2	80,9	4,6	14,5		0,19	27,87	0,76	22,72	0,18	0,39	44,98	0,09	2,8	-
P10	0,0-0,2	64,1	15,2	20,6	Franco Arenoso	0,14	30,69	1,75	3,42	0,35	0,94	60,81	0,11	1,55	-
P11	0,4-0,6	67,3	11,7	21,0		0,18	28,99	0,14	15,95	0,06	0,06	50,64	0,04	2,97	0,78
P12	2,0-2,2	60,4	14,9	24,7		0,15	30,27	0,03	1,88	0,21	0,01	65,64	0,12	1,45	0,20
P13	0,0-0,2	67,8	13,9	18,3	Franco Arenoso	0,25	25,43	0,42	21,25	0,27	0,07	49,36	0,06	2,34	0,38
P14	1,4-1,6	79,3	7,9	12,9		0,16	36,34	0,06	18,66	0,02	0,02	41,86	0,09	2,12	0,52
P15	2,8-3,0	55,6	35,0	9,5	Franco	0,15	23,73	0,81	48,06	0,1	0,69	23,71	0,7	2,01	-
P16	0,0-0,2	64,6	16,2	19,3		0,13	33,06	0,11	3,93	0,04	0,02	60,26	0,03	1,8	-
Mínimo		55,6	1,9	9,5		0,10	9,14	0,03	1,88	0,02	0,01	23,71	0,02	1,43	0,20
Máximo		83,5	35,0	24,7		0,25	38,35	1,75	48,06	1,96	0,94	65,64	0,70	3,02	1,03
Mediana		67,3	13,9	18,3		0,16	28,99	0,18	18,66	0,17	0,07	49,36	0,06	2,01	0,62
Primeiro quartil (Q1)		63,6	8,9	13,7		0,14	26,88	0,09	4,27	0,08	0,05	41,62	0,05	1,81	0,41
Terceiro quartil (Q3)		78,3	15,9	20,7		0,19	32,40	0,68	24,26	0,24	0,24	56,50	0,09	2,49	0,76

¹ - Análises realizadas em laboratório tradicional; ² - análises realizadas por fluorescência de raios X

Cinco amostras da seção geológica foram analisadas individualmente nas respectivas profundidades indicadas na Figura 18. As cinco amostras apresentam apenas a SiO_2 , mesmo utilizando granulometria inferior a $0,038 \mu\text{m}$ nas análises para reduzir a presença deste mineral (P1 - Correnteza, P05 – 5 Biribiri, P09 – Novo manacá, P13 - Lago Azul e P14 – Figueirinha).

De modo geral, as maiores concentrações foram de SiO_2 , variando entre 52,74% para amostra do ponto P5 – Biribiri e 41,86% para amostra do ponto P14 – Figueirinha, seguido do Al_2O_3 , com 38,35% P01- Correnteza e 3,34% para ponto P14 – figueirinha, e depois de Fe_2O_3 , com 22,72% para ponto P09 – Novo manacá - e 4,19% de no ponto P01 – Correnteza, a somatória dos demais elementos Ag CaO, K_2O , P_2O_5 , SO_3 , Ti, e Zr foram $> 2\%$ e $<$ ficou 6% (Figura 5).

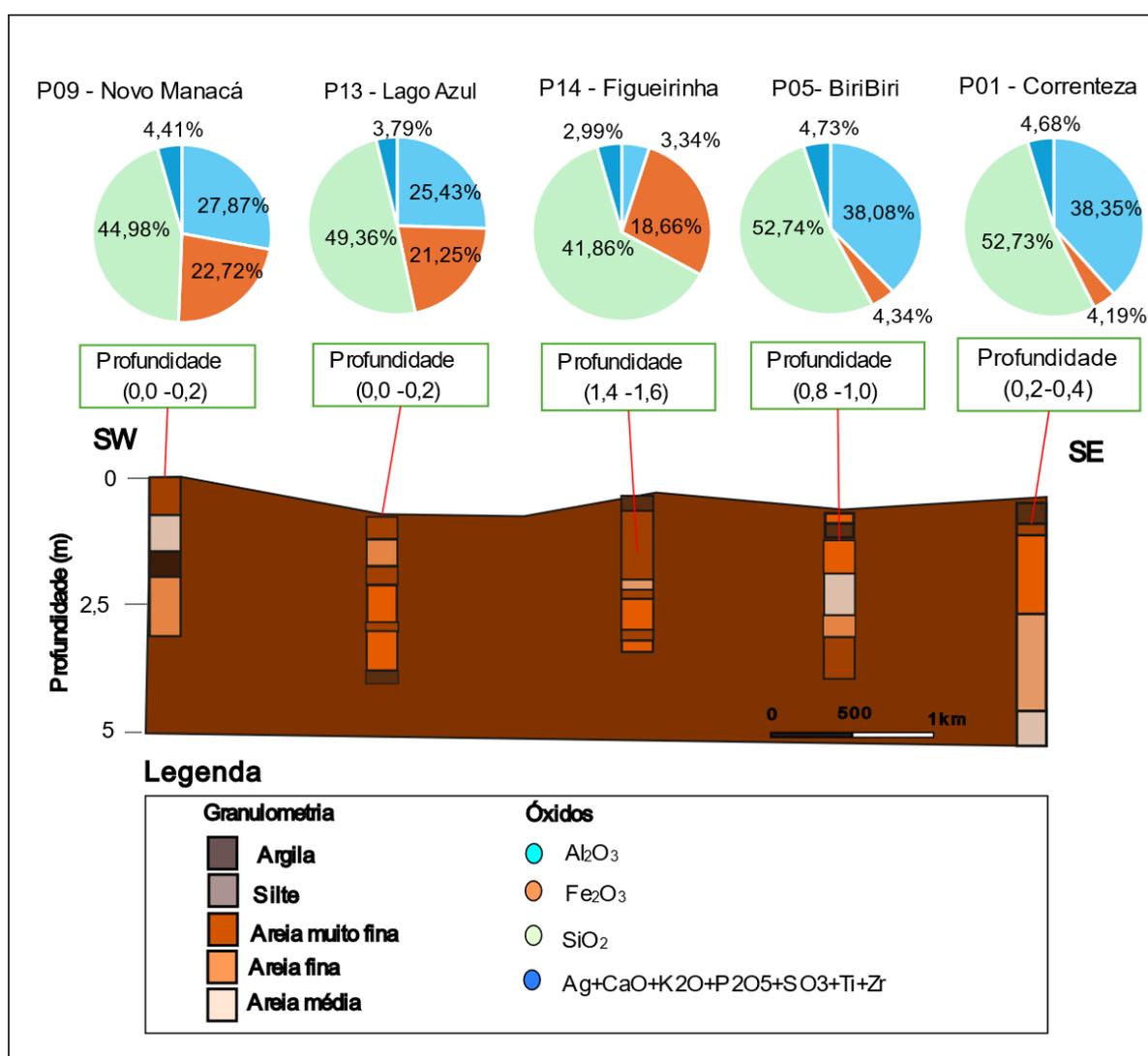


Figura 18: Seção geológica da área de estudo

CONCLUSÕES

Os perfis de granulometria dos 16 pontos analisados neste trabalho mostram predomínio da fração areia, com camadas intercaladas de silte e argila. As profundidades dos pontos variaram de 2 a 5 metros. Não foi identificada uma tendência geral de aumento ou diminuição da granulometria com a profundidade.

A composição mineralogia mostrou-se relativamente homogênea. As amostras de sedimentos analisadas apresentaram a fração areia com dominância e os minerais quartzo, caulinita, goethita, gibbsita, e traços de hematita, rutilo, microclínio e nontronita como constituintes nas amostras.

A análise química e mineralógica realizada com as 16 amostras selecionadas mostrou uma relação bem estabelecida com a predominância de alguns elementos e minerais. Os resultados mostram uma composição química homogênea nas amostras, com a ocorrência de dez óxidos: Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , SiO_2 , SO_3 , Ti e Zr . O SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , apresentam as maiores concentrações em porcentagem.

Portanto, apesar de trabalhos anteriores terem identificado a presença de flúor na água subterrânea e em sedimento destas localidades, nesta pesquisa não foram encontrados minerais cuja composição contenha flúor na análise de Difratomia de Raios X. A exceção foi para amostras do ponto PP- Poço profundo, que além quartzo, feldspato potássico e caulinita, foram encontrados traços de esmectita e vermiculita na profundidade 160 m. É possível que estas duas argilas contenham flúor em sua composição química, e por isso elas devem ser investigadas com atenção na região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o fundamental apoio da FAPEAM pelo apoio financeiro sobre a forma de bolsa de mestrado. A empresa de Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Manacapuru, pelo suporte e disponibilização de recursos para a coleta de dados. Também agradecem aos Laboratórios de Análises Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), ao Laboratório de Análises Minerais – LAMIN do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos – LAMAC pela análise das amostras, sem as quais este trabalho não teria sido possível. Por fim, somos gratos aos revisores pela leitura atenta e pelas sugestões valiosas que contribuíram para o aprimoramento deste manuscrito.

9. REFERÊNCIAS

- AMINI, M.; ABBASPOUR, K. C.; BERG, M.; WINKEL, L.; HUG, S. J.; HOEHN, E.; YANG, H.; JOHNSON, A. 2008. Statistical modeling of global geogenic arsenic contamination in groundwater. *Environmental Science & Technology*, 42 (10).
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas Águas: Segurança Hídrica do Abastecimento Urbano. Brasília, 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- AVENZA SYSTEMS INC. Avenza Maps [aplicativo móvel]. Versão 3.14. Toronto: Avenza Systems Inc., 2023. Disponível em: <https://www.avenza.com/avenza-maps/>. Acesso em: 5 jun. 2024.
- BEZERRA, Isaac Salém AA Afonso C.R. Nogueira, Marcelo B. Motta, André O. Sawakuchi, Thays D. Mineli, Arnaldo de Q. Silva, Antônio G. Silva, Fábio H.G. Domingos, Giovanni A.T. Mata, Felipe J. Lima, Sílvio R.L. Riker. Incision and aggradation phases of the Amazon River in central-eastern Amazonia during the late Neogene and Quaternary. *Geomorphology*, v. 399, p. 108073, 2022.
- BETTERSIZ. Laser Particle Size Analyzer: User's Manual. [S.l.]: Bettersize ST, 2020.
- BISH, D. L., & POST, J. E. (1989). *Modern Powder Diffraction*. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America.
- BRAGG, W. H., & BRAGG, W. L. (1913). *The Reflection of X-rays by Crystals*. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 88, 428-438.
- BRASIL. 1978. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 561 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS no 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS no 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. 29 p. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 23 dez. 2024.

- CAMPOS, M. C.C. **Relação solo-paisagem em uma área de transição arenito-basalto na região de Pereira Barreto (SP)**. Jaboticabal, 2009. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.
- CAPUTO, M.V. 1984. Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil. Tese de Doutorado. Universidade da Califórnia, Santa Bárbara, Ca. 583 p.
- COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL RESPONSE, COMPENSATION AND LIABILITY ACT (CERCLA). Priority List of Hazardous Substances. U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2017. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/ATSDR_2017_SPL_Support_Document.pdf>. Acesso em: 14. Mar. 2018.
- CULLITY, B. D., & STOCK, S. R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction*. Prentice Hall.
- CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. G.; SILVA, O.B. 2007. Bacia do Amazonas. In: Boletim de Geociências da Petrobrás. Rio de Janeiro, v.15, n. 2, p. 227-251.
- D'ANTONA, R. J. G.; REIS, N. J.; ARAÚJO, I. B.; MAIA, M. A. M.; ROSA, S. F.; NAVA, D. B. 2007. Projeto materiais de construção da área Manacapuru - Iranduba - Manaus - Careiro: Domínio Baixo Solimões. Informe de Recursos Minerais, Rochas e Minerais Industriais. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Manaus.
- DE MEYER, C. M. C.; WAHNFRIED, I.; RODRIGUEZ RODRIGUEZ, J. M.; KIPFER, R.; GARCÍA AVELINO, P. A.; CARPIO DEZA, E. A.; BERG, M. Hotspots of geogenic arsenic and manganese contamination in groundwater of the floodplains in lowland Amazonia (South America). *Science of the Total Environment*, v. 860, p. 160407, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160407.
- ELLWOOD, R. et al. 2011. Flúor no controle da cárie. In: Fejerskov, O.; Kidd, E. Cárie Dentária: A doença e seu tratamento clínico. São Paulo: Editora Santos, p. 287-323.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412 p.
- FERNANDES NETO, L. A. 2018. Avaliação de contaminações geogênicas em aquíferos na Bacia do rio Negro - AM. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

- FRANCO, C.; SOARES, E.; DINO, R.; ANTONIOLI, L.; RABELO, C. Caracterização mineralógica dos minerais pesados da unidade sedimentar neógena aflorante na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazônia Central. *Revista Geonorte*, v. 15, 2024. DOI: 10.21170/geonorte.2024.V.15.N.48.82.98.
- FRAXE, T. J. P.; PEREIRA, H. S, WITKOSKI, A. C. (2007). Comunidades ribeirinhas amazônicas: modos de vida e uso dos recursos naturais. Manaus: EDUA, 224 p. ISBN 8574012636.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de Mapas**. 2020. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 23 abri. 2023.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. População residente: Censo 2022: População e Domicílios. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/manacapuru.html>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Portal Cidades, Estado do Amazonas.. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/panorama>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- KLUG, H. P., & ALEXANDER, L. E. (1974). X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials. Wiley-Interscience.
- KOTTEK, M., J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF, AND F. RUBEL, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- LIMA, H. N.; MELLO, J.W.V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. 2006. Mineralogia e química de três solos de uma toposseqüência da Bacia Sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 30:59-68.
- LIMA, R. H. C.; GOMES, C. S. F.; MORENO, M. T. 2011. Geoquímica e mineralogia dos sedimentos argilosos da planície aluvionar do médio rio Jaguaribe – Ceará. In: **Congresso Brasileiro de Geoquímica**, Gramado – RS.
- MATHEUS, J. G. M. 2017. Análise de contaminações em águas subterrâneas nas regiões de Manaus e Humaitá/AM. Trabalho Final de Graduação (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

- MOREIRA, C. R. O.; GURGEL, L. W. Provenance of the Alter do Chão Formation in Amazonas State: Itacoatiara-Paritins Cities, Amazonas Basin, Brazil. *ResearchGate*, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/323322979> Provenance of the Alter do Chao Formation in Amazonas State Itacoatiara-Paritins Cities Amazonas Basin Brazil. Acesso em: 22 dez. 2024.
- MOTTA, P.E.F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J.C.; PEREIRA, N.R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. 2002. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 37:869-878.
- NOGUEIRA, A. C. R.; VIEIRA, L. C.; SUGUIO, K. 1999. Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. In SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 5, Serra Negra, Resumos. Serra Negra, v. 1, p. 261-266.
- PALMA, K. A. L. Gênese e distribuição das silicificações nos paleossolos e rochas sedimentares aflorantes em Manaus. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.
- PECHARSKY, V. K., & ZAVALIJ, P. Y. (2009). *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*. Springer.
- PITA, R. C. DOS S.; SILVA JÚNIOR, G. C. DA; ROSÁRIO, F. F. DO; SILVA, M. L. DA. 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*, v. 18, n. 1, p. 273-296, 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-134253.
- QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; SCHWARZ, M.; PATINO, S.; BAKER, T. R.; CZIMCZIK, C.; FYLLAS, N. M.; MARTINELLI, L.; NARDOTO, G. B.; SCHMERLER, J.; SANTOS, A. J. B.; HODNETT, M. G.; HERRERA, R.; LUIZÃO, F. J.; ARNETH, A.; LLOYD, G.; DEZZEO, N.; HILKE, I.; KUHLMANN, I.; RAESSLER, M.; BRAND, W. A.; GEILMANN, H.; MORAES FILHO, J. O.; CARVALHO, F. P.; ARAUJO FILHO, R. N.; CHAVES, J. E.; CRUZ JUNIOR, O. F.; PIMENTEL, T. P.; PAIVA, R. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, v. 7, p. 1515–1541, 2010. DOI: 10.5194/bg-7-1515-2010.

- REDE VIGIFLUOR. Rede Brasileira de Vigilância da Fluoretação da Água de Abastecimento Público: Manual de Habilitação do Agente Vigifluor. São Paulo: CECOL/USP, 2020.
- RIBEIRO, A.; WAHNFRIED, I.; ANTUNES FERNANDES NETO, L. Levantamento de contaminações geogênicas e antrópicas em águas subterrâneas na cidade de Novo Airão. *Revista Geonorte*, v. 15, n. 48, p. 99-124, 2024. DOI: 10.21170/geonorte.2024.V.15.N.48.99.124.
- SCHNITZER, M.J., BLOCK, S.M., BERG, H.C., PURCELL, E.M. Strategies for chemotaxis. *Symp. Soc. Gen. Microbiol.*, v. 46, p. 15-33, 1990.
- SGB - SERVIÇO GEOLOGICO DO BRASIL – CPRM. *Geologia do município de Manacapuru, Amazonas*. Brasília, DF: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2020. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2020. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/GestaodaInformacaoHidrogeologica/Saiba-Mais>>. Acessado em: 12 de outubro de 2022.
- SILVA, J. H. R. Estudo Geoquímico da Associação entre Fluoreto Encontrado na Água, no Solo e Sedimentos de Manacapuru-AM. 2022. Dissertação (Mestrado em Odontologia). Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2022. 94 p.
- SMEDLEY, P.L.; KINNIBURGH, D.G. A. 2002. Review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters Source and behaviour of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, v.17, p.517-568.
- SOUZA, M. M.1974. Perfil geológico BR-174 (Manaus-Boa Vista): No trecho Manaus-Serra do Abonari. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: SBG, p. 29-33.
- THOMAS, Perfuração. 2001. In: Fundamentos de Engenharia do Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro, Pg 81-87.
- VIEIRA, L.C. 1999. Depósitos fluviais da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas. Trabalho Final de Graduação (TFG), Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 62 p.

WINKEL, L.; BERG, M.; STENGEL, C.; ROSENBERG, T. 2008. Hydrogeological survey assessing arsenic and other groundwater contaminants in the lowlands of Sumatra, Indonesia. *Applied Geochemistry* 23, 3019–3028.