

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Propriedades físico-hídricas e adsorptivas de nitrato, fosfato e potássio em um  
solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil

**Lorena de Paula Cabral**

Tese apresentada para obtenção do título Doutora em  
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas  
Agrícolas

Piracicaba  
2023

Lorena de Paula Cabral  
Engenheira Agrônoma

Propriedades físico-hídricas e adsorptivas de nitrato, fosfato e potássio em um solo da  
Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil  
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas  
Agrícolas

Piracicaba  
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Cabral, Lorena de Paula

Propriedades físico-hídricas e adsorptivas de nitrato, fosfato e potássio em um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil / Lorena de Paula Cabral. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

74 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Floresta Amazônica 2. Curva de retenção de água no solo 3. Deslocamento miscível 4. Conservação ambiental I. Título

## DEDICATÓRIA

**Dedico,**

**A Deus, a minha família e a todas as pessoas que contribuíram para a execução deste trabalho.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter aberto caminhos para que eu pudesse realizar este sonho de estudar na ESALQ-USP e por toda força nos momentos em que me senti fraca diante das adversidades.

Aos meus avós e pais de coração, Joana (in memoriam) e Sebastião, à minha tia Silvia, à minha mãe Cinthia (in memoriam), ao meu irmão Ozéas Junior e à minha filha Eva Victória, por acreditarem em mim e dispender todo o incentivo, suporte e amor para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus queridos entes perdidos durante a pandemia, vovó Jovina, meus tios Zacarias e John Claudio e meu primo Marcos William, por todos os momentos felizes juntos vividos, estarão sempre vívidos em nossos corações.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade de aprimoramento profissional, realizando assim um sonho cultivado por muitos anos desde a graduação.

À Universidade Federal do Amazonas, por ter me concedido afastamento institucional, possibilitando assim a dedicação em tempo integral para a execução deste trabalho.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, pela autorização de coleta de solos na Floresta Nacional do Pau-Rosa e pelo apoio logístico permitindo a participação na visita técnica realizada em setembro de 2020 para entrega de cestas básicas à população tradicional da Flona.

Ao Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda, por acreditar no meu potencial, pelos conhecimentos repassados e principalmente, pela motivação sempre presente, mesmo diante das limitações que nos foram impostas durante esse período de pandemia.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, por aprofundar os conhecimentos a respeito da dinâmica da água no solo em sua disciplina e por ter cedido parte do material utilizado nessa pesquisa.

Aos técnicos, Francisco Bernardo Dias, Paula A. B. Pedro e Gilmar Grigolon pela amizade e auxílio na execução dos experimentos.

Aos queridos amigos, por toda ajuda, apoio, palavras de incentivo e carinho, que tornaram mais leve essa caminhada, em especial Elizângela Jesus, Suellen Hinnah, Mariana Medeiros, Arthur Antunes, Hugo Fukuzava, Vinícius Dias, Evellyn Freire, Laura de la Guardia, Martiliana Freire, Bruna Queiroz entre tantos outros. Deus coloca anjos em nossas vidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida durante o início do curso, enquanto ainda não havia assumido vaga em concurso público.

Enfim, a todos aqueles que tornaram possível essa conquista, seja por palavras ou gestos, meu muito obrigada!

## ΕΠÍΓΡΑΦΕ

*“All I ever wanted*

*All I ever needed*

*Is here in my arms.”*

*Depeche Mode*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>13</b>
<b>2. ANÁLISE DA CONJUNTURA ATUAL AMBIENTAL DO RIO AMANA, FLORESTA NACIONAL DO PAU ROSA, AMAZÔNIA, BRASIL: IMPACTOS FÍSICOS DO GARIMPO DE OURO</b> .....	<b>15</b>
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	15
2.1. INTRODUÇÃO.....	15
2.1.1. <i>As Unidades de Conservação (UCs)</i> .....	16
2.1.2. <i>A Floresta Nacional do Pau-Rosa</i> .....	17
2.1.3. <i>O rio Amana</i> .....	19
2.1.4. <i>A cultura do guaraná (Paullinea cupana Kunth) como alternativa de renda na Flona do Pau-Rosa</i> .....	19
2.1.5. <i>Objetivo geral</i> .....	21
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
2.3. ANÁLISE DA CONJUNTURA AMBIENTAL ATUAL.....	23
2.4. CONCLUSÕES.....	27
AGRADECIMENTOS.....	27
REFERÊNCIAS.....	27
<b>3. PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO DA FLORESTA NACIONAL DO PAU-ROSA, AMAZONAS, BRASIL</b> .....	<b>29</b>
RESUMO.....	29
ABSTRACT.....	29
3.1. INTRODUÇÃO.....	30
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.2.1. <i>Localização da área e amostragem do solo</i> .....	34
3.2.2. <i>Análise físicas e químicas do solo</i> .....	35
3.2.3. <i>Obtenção e modelagem da Curva de Retenção de Água no Solo – CRA</i> .....	36
3.2.4. <i>Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado</i> .....	37
3.2.5. <i>Análise estatística</i> .....	37
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.4. CONCLUSÕES.....	40
AGRADECIMENTOS.....	41
REFERÊNCIAS.....	41
<b>4. PARÂMETROS DE TRANSPORTE DOS ÍONS NITRATO, FOSFATO E POTÁSSIO EM UM SOLO DA FLORESTA NACIONAL DO PAU-ROSA, AMAZONAS, BRASIL</b> .....	<b>43</b>
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	43
4.1. INTRODUÇÃO.....	44
4.1.1. <i>Transporte de solutos no solo</i> .....	44
4.1.2. <i>Modelagem matemática do transporte de contaminantes</i> .....	45
4.1.3. <i>Código CFITIM e software STudio of ANalytical MODels – STANMOD</i> .....	47
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	49
4.2.1. <i>Localização da área, amostragem do solo e preparo do solo</i> .....	49
4.2.2. <i>Análise físicas e químicas do solo</i> .....	50
4.2.3. <i>Soluções deslocadoras</i> .....	51
4.2.4. <i>Caracterização do permeâmetro de carga constante</i> .....	51
4.2.5. <i>Montagem das colunas de solo para elaboração das Breakthrough Curves (BTC's)</i> .....	52
4.2.6. <i>Saturação das colunas de solo por capilaridade</i> .....	53
4.2.7. <i>Lavagem da coluna de solo</i> .....	54
4.2.8. <i>Passagem da solução deslocadora, coleta e análise dos efluentes</i> .....	55

4.2.9. Ajuste numérico das BTCs e obtenção dos parâmetros de transporte pelo código CFITM (STANMOD) .....	55
4.2.10. Análise estatística .....	57
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.4. CONCLUSÕES .....	63
AGRADECIMENTOS .....	63
REFERÊNCIAS .....	64
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>



## RESUMO

**Propriedades físico-hídricas e adsorptivas de nitrato, fósforo e potássio em um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil**

As Florestas Nacionais (Flonas) são áreas sob proteção do Estado e possuem uma cobertura florestal com predomínio de espécies nativas destinadas ao uso múltiplo sustentável dos recursos florestais, bem como, a pesquisas científicas. A Flona do Pau-Rosa é localizada no estado do Amazonas, nos municípios de Maués e Nova Olinda do Norte, cujas atividades de pesquisa desenvolvidas na região são consideradas escassas como relatado em seu plano de manejo publicado no ano de 2018. A hipótese desta pesquisa é que ao se desenvolver estudos técnicos que permitam o fortalecimento da cadeia produtiva das culturas regionais, como o Guaraná da Amazônia, juntamente com o trabalho de educação ambiental por parte dos gestores, ocorra um estímulo aos habitantes da Flona a abandonarem gradativamente atividades ilegais que impactam negativamente o meio ambiente, a citar o garimpo de ouro, contribuindo assim tanto para geração de renda como para o desenvolvimento sustentável da região. Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa foi conhecer a atual conjuntura ambiental da região do rio Amana, Flona do Pau-Rosa, mediante a determinação das propriedades físico-hídricas de um solo de terra firme da região, classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, e avaliar, nessas condições, efeitos de adsorção do nitrato, fosfato e potássio, considerando a recomendação de adubação, realizada na prática por agricultores da região, para cultura do Guaraná, visando contribuir com subsídios para o desenvolvimento da cultura de forma sustentável na região. Buscou-se com isso apresentar os resultados dessa pesquisa em três capítulos. No primeiro capítulo será apresentada uma análise da conjuntura ambiental atual do Rio Amana, realizado por uma visita técnica promovida pelo Instituto Chico Mendes de Biodiversidade, onde pôde-se realizar a coleta do solo analisado nesse estudo. No segundo capítulo serão apresentados os atributos físico-hídricos e químicos do solo da região, Curva de Retenção de Água no Solo (CRA) e a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ). No terceiro capítulo será apresentada a obtenção dos parâmetros de transporte do nitrato, fosfato e potássio, mediante a elaboração e ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's), utilizando-se o modelo STANMOD (*Studio of ANalytical MODels*), a fim de identificar comportamentos de adsorção de nitrogênio, fósforo e potássio, visando o cultivo sustentável de guaraná da Amazônia na região. Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que o Rio Amana apresenta impactos ambientais físicos evidentes, como assoreamento, entretamento do leito do rio e turbidez das águas causados pelo garimpo ilegal de ouro. Os gestores da Flona vêm alertando sobre a irregularidade e estimulado os moradores a desenvolverem outras atividades, dentre elas a

agricultura sustentável, focando em duas culturas industriais com boa rentabilidade: o pau-rosa e o guaraná. Observou-se que o solo apresenta elevada acidez ( $\text{pH} = 3,90$ ), baixa fertilidade, típica de Latossolos Amarelo amazônicos, com teores baixos de Magnésio e Potássio, teores muito baixos de Cálcio e Fósforo, teor médio de Boro e alto de Enxofre. Analisando os parâmetros da CRA para as três diferentes profundidades do perfil, observou-se pouca variação do conteúdo de água entre elas, porém é provável que a camada superior possua maior teor na fração argila, pelo maior desempenho na retenção de água. O conteúdo de água de saturação ( $\theta_s$ ), variou entre 0,4271 e 0,4533  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0-20 > 40 – 60 > 20 -40 cm. O conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ) variou entre 0,0990 e 0,1058  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 40 – 60 > 0 - 20 cm. O parâmetro  $\lambda$  variou entre 0,661 e 0,0732, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 0 – 20 > 40 - 60 cm. O valor de  $n$  variou entre 1,5774 e 1,6812, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0 - 20 > 40 – 60 > 20 - 40 cm. Como  $m$  é calculado a partir do parâmetro “n”, os valores seguiram a mesma tendência. O solo possui boa permeabilidade, representada pela condutividade hidráulica, classificada como moderada ( $K_{\text{sat}} = 4,15 \text{ cm h}^{-1}$ ). Conclui-se que para aumento da produtividade das culturas agrícolas, em ascensão na região como o Guaraná da Amazônia, haja necessidade de correção da acidez do solo, bem como recomendação de adubação. Quanto ao transporte de solutos no perfil de solo da região, considerando o uso sustentável dos recursos naturais, com foco na recomendação de adubação para a cultura do guaraná, acredita-se que o íon mais susceptível a lixiviação no solo de estudo é o  $\text{NO}_3^-$ , seguido pelo íon  $\text{K}^+$  e por fim, o  $\text{PO}_4^{3-}$ . Em termos práticos, o fertilizante fosfato monopotássio apresentou maior tempo de permanência no solo, ficando disponível às plantas e menores riscos de contaminação por lixiviação.

Palavras-chave: Floresta Amazônica, Curva de retenção de água no solo, Deslocamento miscível, Conservação ambiental

## ABSTRACT

**Physical-hydric properties and adsorptives of nitrate, phosphate, and potassium in a soil of the Pau-Rosa National Forest, Amazonas, Brazil**

National Forests (Flonas) are areas protected by the State and have a forest cover predominantly composed of native species, intended for sustainable multiple use of forest resources as well as scientific research. The Pau-Rosa Flona is located in the state of Amazonas, within the municipalities of Maués and Nova Olinda do Norte, where research activities are still in their early stages, as reported in its management plan published in 2018. The hypothesis of this research is that by developing technical studies to strengthen the production chain of regional crops, like Amazonian Guaraná, and bolstering environmental education efforts, we can encourage Flona residents to gradually abandon environmentally harmful illegal activities like gold mining. This would contribute to both income generation and sustainable development of the region. Thus, the main objective of this research was to understand the current environmental situation in the Amana River region, Pau-Rosa National Forest, Amazonas, by determining the physico-hydraulic properties of a terra firme soil in the region, classified Udox, and evaluate the dynamics of nitrate, phosphate, and potassium under these conditions, considering the fertilizer recommendation for Amazonian Guaraná cultivation, aiming to provide subsidies for the sustainable development of the crop in the region. The findings of this research are presented in three chapters. The first chapter provides an analysis of the current environmental situation of the Amana River, based on a technical visit organized by the Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), during which the soil for this study was collected. The second chapter presents the physical-hydraulic and chemical characteristics of the soil in the region, Soil Water Retention Curve (SWRC) and saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ). The third chapter presents the determination of nitrate, phosphate, and potassium transport parameters through the development and numerical adjustment of Breakthrough Curves (BTCs), using the STANMOD (Studio of ANalytical MODels) model, to identify the displacement behaviors of nitrogen, phosphorus, and potassium and promote sustainable cultivation of Amazonian Guaraná in the region. Based on the results obtained, it's clear that the Amana River is experiencing noticeable physical environmental impacts, such as siltation, riverbed narrowing, and water turbidity, all caused by illegal gold mining. The managers of FLONA have been raising awareness about these irregularities and encouraging residents to engage in alternative activities, including sustainable agriculture, with a focus on two profitable industrial crops: pau-rosa and guaraná. The soil analysis revealed high acidity ( $pH = 3.90$ ) and low fertility, typical of Amazonian Udox, with low levels of magnesium and potassium, very low levels of calcium and phosphorus, medium levels of boron, and high levels of sulfur. Analyzing the SWRC parameters for the three different depths of the soil profile, little variation in water content was observed, although it is likely that the top layer has a higher clay fraction, leading to better water retention. The saturation water content ( $\theta_s$ ), ranged from 0.4271 to 0.4533  $cm^3 cm^{-3}$ , in descending order of values in the 0-20 > 40-60 > 20-40 cm profiles. The residual water content ( $\theta_r$ ) ranged from 0.0990 to 0.1058  $cm^3 cm^{-3}$ , in descending order of values in the 20-40 > 40-60 > 0-20 cm profiles. The parameter  $\lambda$  ranged from 0.661 to 0.0732, in descending order of values in the 20-40 > 0-20 > 40-60 cm profiles. The value of  $n$  ranged from 1.5774 to 1.6812, in descending order of values in the 0-20 > 40-60 > 20-40 cm profiles. Since  $m$  is calculated based on  $n$ , the values followed the same trend. The soil has good permeability, represented by moderate hydraulic conductivity ( $K_{sat} = 4.15 cm h^{-1}$ ). The conclusion drawn is that to increase agricultural productivity, especially for crops like Amazonian Guaraná, there's a need to correct soil acidity and provide appropriate fertilizer recommendations. Regarding solute dynamics in the region's soil, considering the sustainable use of natural resources and the fertilizer recommendation for guaraná cultivation,

it is believed that the most leachable ion in the study soil is  $\text{NO}_3^-$ , followed by  $\text{K}^+$  and, finally,  $\text{PO}_4^{3-}$ . In practical terms, the monopotassium phosphate fertilizer showed the longest residence time in the soil, remaining available to plants and posing lower risks of leaching contamination.

Keywords: Amazon Rainforest, Soil water retention curve, Miscible displacement, Environmental conservation



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O uso de fertilizantes agrícolas de forma sustentável tem se tornado um dos grandes desafios ambientais da atualidade. Em um planeta onde a população torna-se cada vez maior em número e em longevidade, o aumento da produção de alimentos faz-se necessário, impulsionando o mercado agrícola, que tem buscado aprimorar as técnicas e os insumos em prol de uma maior produtividade. Em face a isso, muitas vezes o quesito ambiental acaba sendo negligenciado, trazendo como consequências impactos nos mais diferentes ambientes naturais.

A atividade agrícola é apenas uma das atividades antrópicas que ao longo dos anos vem degradando o meio ambiente. Diante dessa realidade, áreas no mundo inteiro têm sido demarcadas, destinadas à preservação e conservação dos recursos naturais, denominadas de Unidades de Conservação (UCs). No Brasil, estas regiões foram legalmente instituídas pela Lei 9.985 de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação. A normativa divide as UCs em dois grandes grupos. O primeiro são as Unidades de Proteção Integral, com objetivo básico de preservação da natureza, admitindo apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos nessa lei. E o segundo, são as Unidades de Uso Sustentável, com objetivo básico de compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos.

Dentro do grupo Unidades de Uso Sustentável, há subgrupos com finalidades diferentes, dentre eles as Florestas Nacionais (Flonas), que são definidas como áreas de cobertura florestal de espécies predominantemente nativas, com objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável.

A Flona do Pau-Rosa, local de coleta desse estudo, foi instituída somente no ano de 2001. Sua área abrange 988.186 hectares, localizados no estado do Amazonas nos municípios de Maués (98,5%) e Nova Olinda do Norte (1,5%). Situa-se na bacia do rio Amazonas, entre os rios Madeira e Tapajós, uma região de extensa floresta amazônica que contém quatro rios principais: o Paraconí, Abacaxis, Parauari e o Amana. O nome da Flona refere-se à espécie Pau-rosa (*Aniba roseodora* Ducke), uma árvore com grande importância econômica para a região amazônica em função do óleo essencial com grande valor comercial – o linalol – utilizado como fixador na indústria de perfumaria, sendo o município de Maués um dos locais de grande exploração na década de 90.

A Flona do Pau-Rosa é considerada de importância extremamente alta para a conservação da biodiversidade, devido ao expressivo número de espécies endêmicas. Ressalta-se que, no ato de criação, aos povos tradicionais, foi permitida a permanência na região, porém impondo ao órgão gestor a responsabilidade pela capacitação ao manejo sustentável dos recursos naturais e em casos específicos, a possibilidade de comercialização. Atividades ilegais, como o garimpo de ouro, tem sido relatadas, principalmente na região sul da Flona, impactando diretamente na qualidade da água do rio Amana, que já apresenta diversos impactos, dentre eles o assoreamento, estreitamento de leito, turbidez das águas e provável contaminação química por mercúrio, elemento largamente utilizado na extração do ouro.

O órgão responsável pela gestão das Unidades de Conservação, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio, vem promovendo diálogos com trabalhadores de garimpo e demais habitantes da região, visando conscientizar dos impactos ambientais da atividade e apresentar alternativas econômicas viáveis e rentáveis, como cultivo de algumas culturas, especialmente o Guaraná da Amazônia (*Paullinea Cupana* Kunth).

O cultivo do Guaraná tem sido incentivado, principalmente, por se tratar de uma cultura nativa com grande valor histórico para os povos indígenas da região e seus descendentes e com o objetivo de atender a demanda do fruto por empresas estabelecidas na cidade de Maués, tradicionalmente conhecida como a terra do Guaraná no Amazonas.

Conforme o plano de manejo da Flona, a cultura, cultivada tradicionalmente pela tribo indígena Sateré-Mawé, necessita de estudos para determinar formas sustentáveis de cultivo, principalmente após a difusão do guaraná melhorado pelas instituições: Companhia de Bebidas das Américas (AMBEV), Governo do Estado do Amazonas e Prefeitura de Maués.

A hipótese desse estudo é que mesmo sendo consideradas ilegais, atividades de garimpo continuam sendo desenvolvidas na região, impactando tanto na qualidade de vida dos habitantes quanto no meio ambiente através do despejo de rejeitos inadequadamente. Acredita-se que ao se desenvolver estudos técnicos que permitam o fortalecimento da cadeia produtiva de culturas regionais, como o Guaraná da Amazônia, juntamente com o trabalho de educação ambiental por parte dos gestores da Flona, ocorra um abandono gradativo de atividades ilegais que impactam negativamente o meio ambiente, como o garimpo de ouro, contribuindo assim tanto para geração de renda, quanto para o desenvolvimento sustentável da região.

Nesta perspectiva, o objetivo geral dessa pesquisa foi conhecer a conjuntura ambiental atual da região do rio Amana, Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, mediante a determinação das propriedades físico-hídricas de um solo de terra firme da região e avaliar efeitos adsorptivos do nitrato, fosfato e potássio, considerando a recomendação de adubação para o Guaraná da Amazônia (*Paullinea Cupana* Kunth), visando contribuir com subsídios para o desenvolvimento da cultura de forma sustentável na região. Os objetivos específicos foram: a) analisar a conjuntura ambiental do Rio Amana, Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazônia, Brasil, por meio de visita técnica promovida pelo ICMBio; b) obtenção das características físicas, químicas e hídricas do solo da região; c) determinação da Curva de Retenção da Água no solo, e determinação da condutividade hidráulica do solo saturado; e d) obtenção dos parâmetros de transporte do nitrato, fosfato e potássio, por meio da elaboração e ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's).

A pesquisa será apresentada em quatro capítulos. 1. Introdução Geral, 2. Análise da conjuntura atual ambiental do Rio Amana, Floresta Nacional do Pau Rosa, Amazônia, Brasil: impactos físicos do garimpo de ouro, 3. Propriedades físico-hídricas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil: retenção e condução de água no solo, e 4. Parâmetros de transporte dos íons nitrato, fosfato e potássio em um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazonas, Brasil.

## 2. ANÁLISE DA CONJUNTURA ATUAL AMBIENTAL DO RIO AMANA, FLORESTA NACIONAL DO PAU ROSA, AMAZÔNIA, BRASIL: IMPACTOS FÍSICOS DO GARIMPO DE OURO

Lorena de Paula Cabral<sup>1</sup>, Jarbas Honorio de Miranda<sup>2</sup>, Jacqueline Martins Gomes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Profª. Assistente do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, AM, Brasil; <sup>2</sup>Profº Associado 3, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil; <sup>3</sup>Analista do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Maués, AM, Brasil.

### Resumo

As Florestas Nacionais (Flonas) são áreas sob proteção do Estado e possuem uma cobertura florestal com predomínio de espécies nativas destinadas ao uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e às pesquisas científicas. É importante que sejam elaborados planos de manejo adequados para essas regiões que permitam atividades econômicas que promovam o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente. A hipótese desse estudo é que mesmo sendo consideradas ilegais, atividades de garimpo continuam sendo desenvolvidas na região e impactam tanto na qualidade de vida dos habitantes quanto no meio ambiente devido ao despejo inadequado de rejeitos. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo conhecer e analisar a conjuntura atual ambiental da Flona do Pau-Rosa, localizada no estado do Amazonas, nos municípios de Maués e Nova Olinda do Norte, como um trabalho preliminar. E, a partir do entendimento desse cenário, promover pesquisas que possam contribuir cientificamente com dados técnicos que possibilitem aos analistas ambientais, maior embasamento na tomada de decisão no gerenciamento dessas áreas. Foi realizada uma visita técnica, por via fluvial, que percorreu três rios principais da Flona. A partir disso, percebeu-se que a grande problemática da região gira em torno do garimpo ilegal de ouro, causando impactos físicos evidentes, com maior impacto no Rio Amana. Dessa forma, foram relatados nesse estudo os seguintes aspectos: (a) impactos físicos evidentes do garimpo de ouro ilegal; (b) a dualidade de opiniões entre garimpeiros e a população tradicional sobre tais impactos, (c) prospecção da cultura do guaraná da Amazônia, como alternativa de fonte de renda na região, e (d) sugestões de pesquisas futuras.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, impacto ambiental, Áreas protegidas, *Paullinia cupana*.

### Abstract

National Forests (FLONAs) are areas protected by the state, predominantly covered with native species, intended for sustainable use of forest resources and scientific research. Developing appropriate management plans for these regions that promote sustainable development and environmental preservation through economic activities is important. Despite being considered illegal, this study hypothesizes that mining activities persist in these regions, negatively impacting both the quality of life of the inhabitants and the environment through improper waste disposal. Thus, the objective of this research was to understand and analyze the current environmental situation of the Pau-Rosa National Forest, located in the state of Amazonas, within the municipalities of Maués and Nova Olinda do Norte, as preliminary work. With a thorough understanding of this scenario, the aim is to promote research that can contribute scientific data, providing environmental analysts with a solid basis for decision-making in managing these areas. A technical visit was conducted along three main rivers of the National Forest. The most significant issue observed was illegal gold mining, which has caused notable physical impacts, with the Amana River being the most affected. Therefore, this study reports the following aspects: (a) the clear physical impacts of illegal gold mining, (b) the diverging opinions between miners and the traditional population regarding these impacts, (c) the exploration of Amazonian guaraná cultivation as an alternative income source in the region, and (d) suggestions for future research.

**Keywords:** Sustainability, environmental impact, protected areas, *Paullinia cupana*.

### 2.1. Introdução



### 2.1.1. As Unidades de Conservação (UCs)

Atualmente, uma das maiores preocupações em termos mundiais é conciliar o desenvolvimento humano com a conservação dos recursos naturais, principalmente em relação às florestas naturais. É importante que a conservação da biodiversidade ocorra de forma funcional, considerando a preservação dos ecossistemas, mas também permitindo ao homem o uso dos serviços ambientais e a exploração econômica desde que feito de forma sustentável.

Diante dessa necessidade, houve a criação de áreas demarcadas pelo mundo todo, destinadas à preservação e conservação dos recursos naturais, denominadas de Unidades de Conservação (UCs). No Brasil, essas regiões estão regidas pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), instituído pela Lei 9.985 de 18 de julho de 2000, estabelecendo critérios e normas para criação, implantação e gestão das unidades de conservação (BRASIL, 2000).

Segundo a lei 9.985 de 18 de julho de 2000, artigo 2º, inciso I, a definição de unidades de conservação é:

*(...) espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção.*

Já no seu 7º artigo, o SNUC divide as unidades de conservação em dois grandes grupos. O primeiro são as Unidades de Proteção Integral, com objetivo básico de preservação da natureza, admitindo apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos nessa lei. E o segundo, são as Unidades de Uso Sustentável, com objetivo básico de compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de uma parcela dos seus recursos.

As Unidades de Uso Sustentável, são divididas nas seguintes categorias: Áreas de Proteção Ambiental (APA), Áreas de Relevante Interesse Ecológico (ARIE), Floresta Nacional (Flona), Reserva Extrativista (RESEX), Reserva de Fauna (REFAU), Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) e Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN).

As Flonas são definidas no artigo 17º, como:

*Art 17. A Floresta Nacional é uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas.*

A lei determina ainda que as Flonas são de posse e domínio público, sendo que áreas particulares presentes na região durante a sua criação precisam ser desapropriadas. Uma exceção é realizada às populações tradicionais, onde sua permanência é permitida, uma vez que já habitavam a região antes da sua criação, porém em conformidade com o disposto e regulamento e no Plano de Manejo da unidade. A visitação pública é permitida, desde que atendendo às normas impostas pelo órgão gestor. A pesquisa científica é permitida e incentivada, porém com prévia autorização também do órgão gestor (BRASIL, 2000).

O Plano de Manejo de uma Flona é um documento técnico elaborado pelo órgão gestor, com auxílio de instituições parceiras, que a partir dos objetivos gerais da UC, estabelece o seu zoneamento e as normas que devem presidir o uso da área e o manejo dos recursos naturais, incluindo-se a implantação das estruturas físicas necessárias à gestão da unidade (BRASIL, 2000).

Visando a criação do órgão que seria incumbido de gerir essas UCs, foi instituída a Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007, que dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Biodiversidade -ICMBIO, de autarquia federal, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, com a finalidade de:

*Art. 1º (...)*

I - Executar ações da política nacional de unidades de conservação da natureza, referentes às atribuições federais relativas à proposição, implantação, gestão, proteção, fiscalização e monitoramento das unidades de conservação instituídas pela União;

II - Executar as políticas relativas ao uso sustentável dos recursos naturais renováveis e ao apoio ao extrativismo e às populações tradicionais nas unidades de conservação de uso sustentável instituídas pela União;

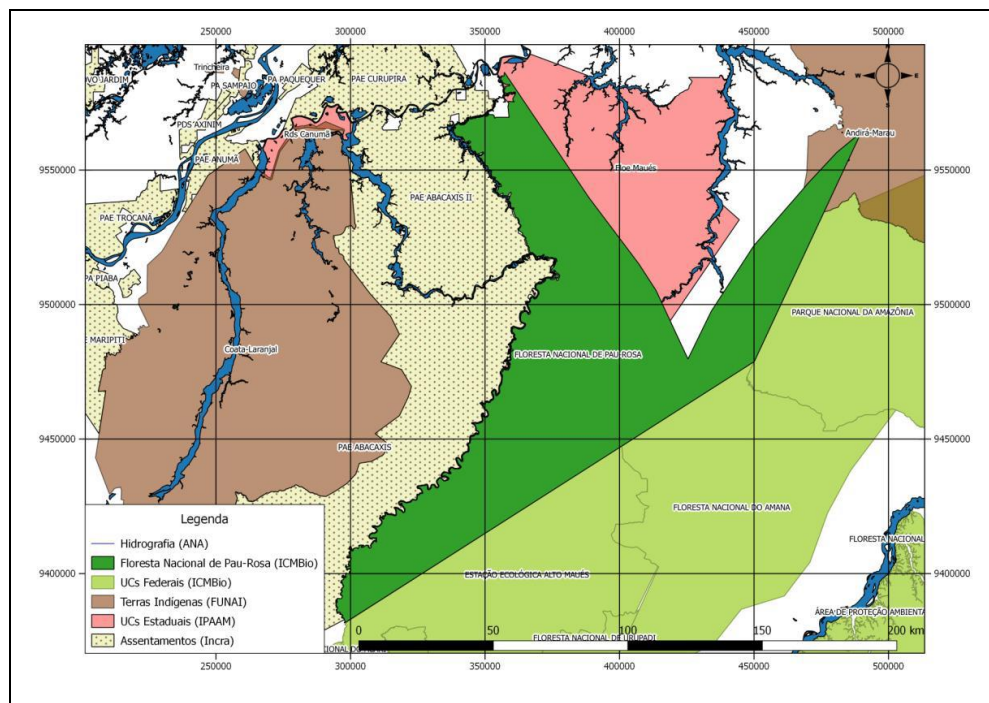
III - Fomentar e executar programas de pesquisa, proteção, preservação e conservação da biodiversidade e de educação ambiental;

IV - Exercer o poder de polícia ambiental para a proteção das unidades de conservação instituídas pela União; e

V - Promover e executar, em articulação com os demais órgãos e entidades envolvidos, programas recreacionais, de uso público e de ecoturismo nas unidades de conservação, onde estas atividades sejam permitidas.

### 2.1.2. A Floresta Nacional do Pau-Rosa

Instituída pelo Decreto s/n de 07, de agosto de 2001, a Flona do Pau-Rosa possui 988.186 hectares, localizados no estado do Amazonas divididos entre os municípios de Maués (98,5%) e Nova Olinda do Norte (1,5%) (Figura 1). Situa-se na bacia do rio Amazonas, entre os rios Madeira e Tapajós, consistindo em uma região de extensa Floresta Amazônica, contendo quatro rios principais: o Paraconi, Abacaxis, Parauari e Amana. O nome da Flona refere-se à espécie Pau-rosa (*Aniba roseodora* Ducke), uma árvore com grande importância econômica para a região amazônica em função do óleo essencial com grande valor comercial, o linalol, utilizado como fixador na indústria de perfumaria, sendo o município de Maués, um dos locais de grande exploração na década de 90 (ICMBIO, 2018).

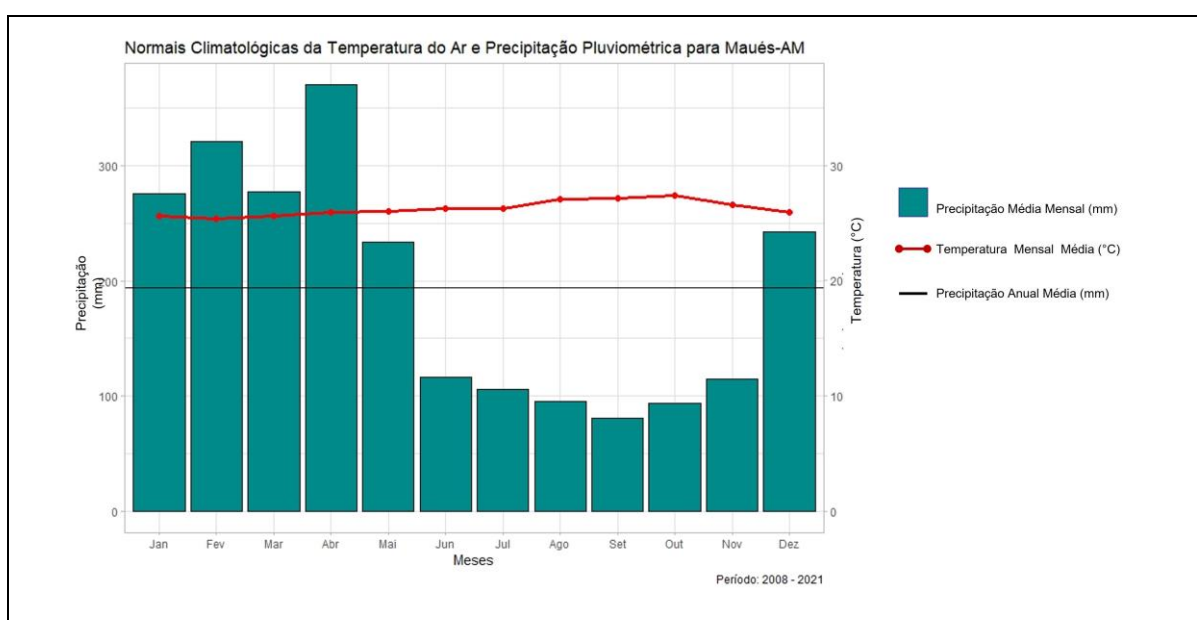


**Figura 1.** Mapa da localização regional da Flona do Pau-Rosa. Fonte: ICMBio, 2018.

A região apresenta elevadas temperaturas e precipitações anuais, onde existem apenas duas estações bem distintas ao longo do ano: a estação chuvosa (localmente chamada de inverno) entre os meses de dezembro a maio e a estação de seca (localmente chamada de estiagem), menos chuvosa, que se estende de junho a novembro. A classificação de Köppen adaptada para o Brasil para a região é do tipo “A” – Clima tropical úmido, com a temperatura média do mês mais frio nunca inferior a 18°C, com subclima do tipo “m” – Clima de Monção, com precipitação

excessiva durante alguns meses, compensando a ocorrência de um ou dois meses com precipitações inferiores a 60 mm (ICMBIO, 2018).

Pela Figura 2 pode-se verificar a Normal Climatológica para o município de Maués, corroborando com a classificação acima descrita. Os dados da série histórica de temperatura e precipitação (médias mensais) foram obtidos pelo Banco de Dados Meteorológicos do INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br/>), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são referentes ao período de abril de 2008 a maio de 2021, período funcionamento da estação automática, localizada no município de Maués, que foi desativada por problemas técnicos. Os valores máximos de precipitação ocorrem no mês de abril (370,3 mm), mínimo no mês de setembro (81,1 mm), a média mensal anual de precipitação é de 193,97 mm e a diária consequentemente é de 6,37 mm. A temperatura se mantém estável durante o ano, com média em 26,7°C.



**Figura 2.** Normal Climatológica da Temperatura Média do Ar (°C) e Precipitação Média (mm) para a cidade de Maués, Amazonas. Período: 2008-2021.

Já os solos são classificados como Latossolos Amarelo Distróficos, com relevo ondulado a forte ondulado. Apresentam perfil profundo, com baixa fertilidade natural e baixa saturação por bases, ácidos a muito fortemente ácidos, com boa drenagem e permeáveis, por se tratar de solos muito intemperizados (RADAM, 1975).

Os locais de ocupação humana, apresentam padrão esparsos, em famílias isoladas ou em concentração sob a forma de comunidades e geralmente próximos aos rios que cortam a região, que utilizam para retirar o pescado (base alimentar principal), para consumo e higiene pessoal e também como rota de descolamento para centros urbanos. Os habitantes possuem descendência indígena das etnias Sateré Mawé e Munduruku e desenvolvem atividades agrícolas no formato mais tradicional, com ênfase nas culturas do guaraná (*Paullinia cupana*), mandioca (*Manihot esculenta*), frutíferas regionais (cupuaçu, goiaba, açaí etc.), que além da pesca, praticam a caça e o extrativismo. Ocorre também a criação de pequenos animais como a galinha caipira, principalmente em épocas que a disponibilidade de peixes e de gado bubalino (permitida no plano de manejo) diminuem. Atualmente, as comunidades iniciaram o interesse no cultivo de Pau-Rosa (*Aniba roseadora*) devido a grande demanda pelas indústrias de cosméticos (ICMBIO, 2018; SOUZA et al., 2020).

De forma geral, a Flona é considerada de extrema importância para a conservação da biodiversidade, devido ao expressivo número de espécies endêmicas. Ressalta-se que, no ato de criação, os povos tradicionais foram mantidos na região, impondo ao órgão gestor a responsabilidade pela capacitação ao manejo sustentável dos recursos naturais e em casos específicos, a comercialização. Atividades ilegais, como garimpo de ouro, têm sido relatadas, principalmente na região sul da Flona, impactando diretamente na qualidade da água do rio Amana.

### **2.1.3. O rio Amana**

A bacia do rio Amana possui uma área total de 552.455,8 hectares (5.524,5 km<sup>2</sup>), dos quais 281.396,3 hectares (2.814 km<sup>2</sup>) estão inseridos na Flona Nacional do Amana e 271.059,5 hectares (2.710,5 km<sup>2</sup>) na Flona do Pau-Rosa, com extensão estimada de 165 km até o seu ponto de confluência com o rio Parauari, quando juntos dão origem ao rio Maués-Açú, que banha as margens do município de Maués (ICMBIO, 2010). As atividades realizadas a montante, na Flona do Amana, afetam diretamente a qualidade da água a jusante, na Flona do Pau-Rosa.

É relatada uma grande interferência antrópica associada às atividades de garimpo. A Flona do Amana contém em seu decreto de criação, a possibilidade de autorização, em alguns casos, desta atividade, que já ocorria de forma irregular antes da sua criação, desde que sujeita à legalização pelo órgão responsável. No entanto é comum a presença de garimpos ilegais sem o devido licenciamento e autorização de lavra (ICMBIO, 2010). Isto tem gerado graves consequências para os solos e para qualidade da água que, segundo os técnicos da CPRM, é imprópria inclusive para banho devido à quantidade elevada de metais pesados detectados nas medições realizadas nesse rio (ICMBIO, 2010, 2018).

É perceptível, ao longo da bacia, nos igarapés onde estão instalados os garimpos, elevada turbidez da água, modificação no leito dos igarapés, carreamento de solo para os corpos hídricos e outras pressões associadas. Sendo assim, no Plano de Manejo da Flona do Pau-Rosa, é destacada a importância de que estudos técnicos esclareçam se essa característica é de origem natural ou antrópica (ICMBIO, 2010, 2018).

Por conta desses prováveis impactos ambientais, tem sido desenvolvidos pelo ICMBIO, reuniões com orientações aos trabalhadores de garimpo, de forma a conscientizar dos impactos ambientais da atividade e apresentar alternativas econômicas viáveis e rentáveis, como cultivo de algumas culturas como o Pau-Rosa (*Aniba rosaeodora* Duck) e o Guaraná cultivado (*Paullinea Cupana* Kunth), visando diminuir ao longo do tempo o exercício desta atividade de forma ilegal.

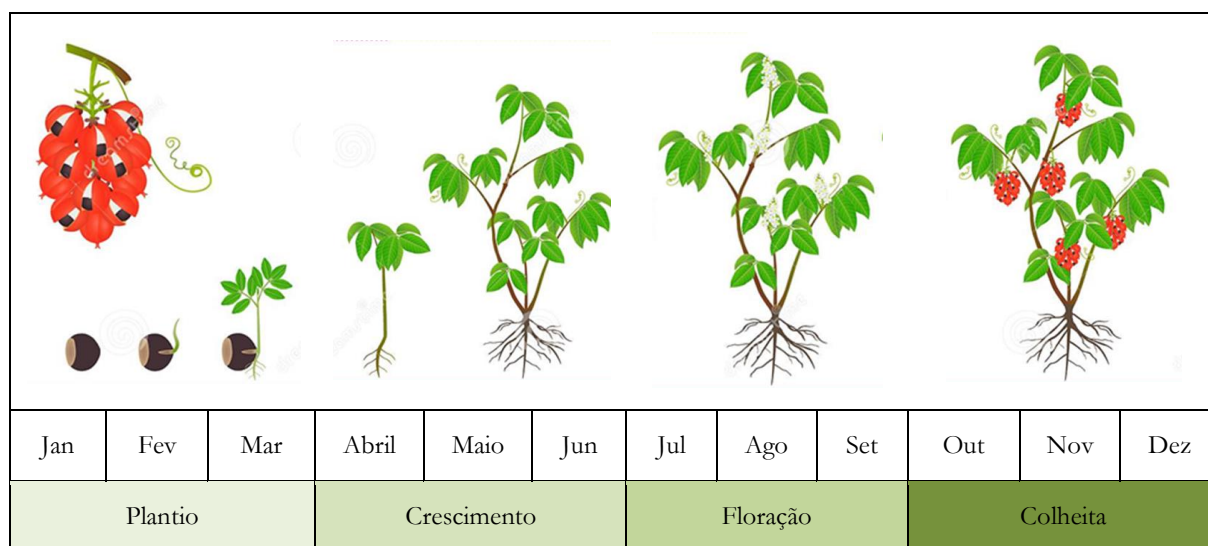
### **2.1.4. A cultura do guaraná (*Paullinea cupana* Kunth) como alternativa de renda na Flona do Pau-Rosa**

Atualmente o ICMBio tem buscado fortalecer a cadeia produtiva do Guaraná pelos habitantes da Flona do Pau-Rosa, visando atender a demanda pelo fruto por empresas estabelecidas na cidade de Maués, conhecida como a terra do Guaraná no Amazonas. Conforme o Plano de Manejo, a cultura, cultivada tradicionalmente pela tribo indígena Sateré-Mawé, necessita de mais estudos para determinar formas seguras de cultivo, visando a prevenção de impactos ambientais, principalmente após a difusão do guaraná melhorado pela Companhia de Bebidas das Américas (AMBEV), Governo do Estado do Amazonas e Prefeitura de Maués (ICMBIO, 2018).

Além do valor comercial, para os povos amazônicos, a cultura apresenta valor cultural e religioso, envolvendo muita misticidade advinda das lendas indígenas. A lenda do guaraná, originada na tribo indígena dos Satere-Mawés, relata que um casal de índios que já viviam juntos há anos, almejavam ter pelo menos um filho, mas não conseguiam, apesar de inúmeras tentativas ao longo dos anos. Então decidiram pedir a Tupã, o rei dos deuses, uma criança para completar a sua felicidade. Tupã, reconhecendo a bondade do casal, atendeu ao desejo com o nascimento de um lindo garoto. Diante de toda aquela alegria e gratidão do casal, Jurupari, o deus da escuridão, movido pela inveja se aproveitou do momento em que o garoto, já criança, coletava frutos na floresta, se transformou em uma cobra venenosa, para envenenar o menino, matando-o instantaneamente. Ao receber a notícia, a mãe começou a chorar desesperadamente e fortes trovões e relâmpagos caíram sobre a aldeia, assim, a mãe entendeu como um sinal de que deveria plantar os olhos da criança, de onde teria surgido o guaraná, cujo fruto possui sementes negras com um arilo branco ao seu redor, semelhante a um olho humano (PEREIRA, 2003).

Foi na cidade de Maués que se iniciou o manejo e plantio do guaraná como uma cultura agrícola, antes utilizado somente para fins medicinais, de rituais de guerra e religiosos pelos indígenas. Inicialmente a finalidade era atender a demanda européia como umas das especiarias incluídas em remédios. A produção do guaraná foi fundamental para o crescimento e desenvolvimento da cidade, principalmente durante as décadas de 60 e 70 com a comercialização e o processo tecnificado da cultura. Foi nesse período que houve um grande aumento da demanda do produto proveniente da instalação da empresa de bebida Antarctica (atualmente AMBEV) na referida cidade. Visando suprir a necessidade de informações que melhorassem o manejo, aumentando assim a produção requisitada pela demanda, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), instalou uma fazenda experimental na região para estudos científicos da cultura (SANTOS et al., 2021).

Sabe-se que as fases de desenvolvimento da cultura estão diretamente relacionadas com a precipitação pluviométrica, uma vez que o plantio é feito durante o período chuvoso (janeiro a março), a floração ocorre durante o período mais seco do ano (julho a setembro) e por fim, a frutificação ocorre de dois a três meses depois, onde a colheita é realizada (Figura 3). A maturação do fruto não é uniforme, podendo ter até mais de uma colheita, em média três, para a mesma planta (SANTOS et al., 2021).



**Figura 3.** Ciclo do desenvolvimento do Guaraná (*Paullinea cupana*). Fonte: Nadiia Havryliuk Kharzhevskya adaptado.

A hipótese desse estudo é que mesmo sendo consideradas ilegais, atividades de garimpo continuam sendo desenvolvidas na região, impactando tanto na qualidade de vida dos habitantes quanto no meio ambiente por meio do

despejo inadequado de rejeitos. Acredita-se que ao se desenvolver estudos técnicos que permitam o fortalecimento da cadeia produtiva das culturas regionais, como o Guaraná da Amazônia, juntamente com o trabalho de educação ambiental por parte dos gestores, ocorra um estímulo aos habitantes da Flona a abandonarem gradativamente atividades ilegais que impactam negativamente no meio ambiente, a citar o garimpo de ouro, contribuindo assim tanto para geração de renda como para o desenvolvimento sustentável da região.

### **2.1.5. Objetivo geral**

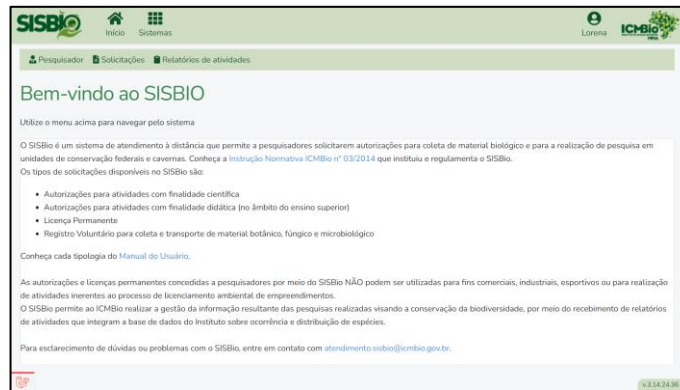
Diante desse cenário, o objetivo desse trabalho foi conhecer a conjuntura ambiental atual do Rio Amana, Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazônia, Brasil, a fim de conceber idéias de pesquisas científicas futuras que possam vir a contribuir com a gestão da área de modo a usar os recursos naturais de forma sustentável.

## **2.2. Material e Métodos**

O Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio), órgão gestor da Flona do Pau-Rosa, visando o desenvolvimento sustentável da região, tem buscado parcerias com outras instituições de forma a contribuir com o enriquecimento científico para melhorar a gestão dos recursos naturais. Diante disso, espaço aos pesquisadores tem sido aberto, principalmente com apoio logístico ao acesso à região, o que possibilitou o desenvolvimento dessa pesquisa.

O órgão realiza visitas periódicas às comunidades, porém em 2020, com o avanço da pandemia do Coronavírus (COVID-19), todas as atividades presenciais não essenciais foram suspensas visando a prevenção da contaminação das comunidades tradicionais da região. No entanto, no ano de 2021, marcado pelo início da vacinação, as atividades presenciais do ICMBIO fossem retomadas gradativamente a partir no mês de novembro. E assim ocorreu o planejamento de uma visita técnica, por via fluvial, com duração de 13 dias na Flona do Pau-Rosa, com os seguintes objetivos principais: realização da entrega de cestas básicas para famílias beneficiárias; emissão de Declaração de Aptidão ao Pronaf (DAP); atualização do cadastro de beneficiários da Flona e articulação institucional no âmbito do Conselho Consultivo junto às comunidades representadas. Adicionalmente, foi permitida a inclusão da autora desse trabalho na equipe técnica, originando com objetivo secundário, a avaliação da conjuntura ambiental atual do Rio Amana.

Formalmente, o profissional interessado em realizar pesquisas dentro da Flona precisa submeter uma proposta de pesquisa por meio do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO), disponível no link: <https://sisbio.sisICMBio.ICMBio.gov.br/> (Figura 4). Uma vez aprovada a proposta pelos analistas do ICMBio, é então emitida uma Autorização para Atividades com Finalidade Científica. Excepcionalmente, por conta da pandemia de COVID-19, houve também a exigência do cartão de vacinação, contendo a comprovação com pelo menos uma dose de imunização.



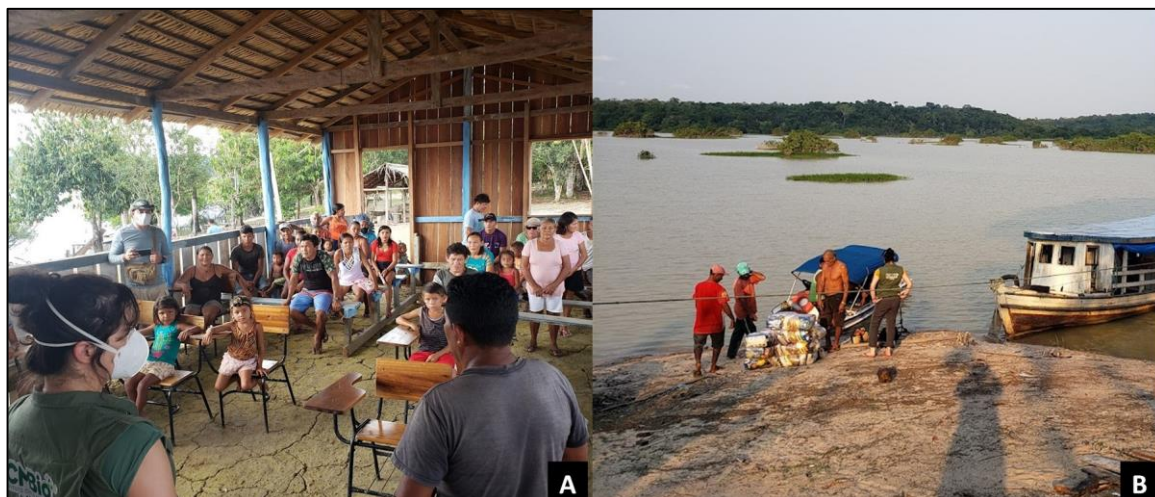
**Figura 4.** Print Screen da tela inicial do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO).

A equipe técnica foi composta por integrantes de diferentes instituições: Claudio Silva, Paulo Ramos e Jacqueline Gomes (ICMBio); Eder Junior e Givanildo Oliveira (IDAM); Fábio Magalhães (IFAM) e; a autora, Lorena de Paula Cabral, Docente da UFAM e Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas (PPGESA/Esalq/USP) (Figura 5). Todas as medidas fitossanitárias recomendadas pelo Ministério da Saúde, em face a pandemia de COVID-19, como uso de máscara, álcool em gel e distanciamento social, foram respeitadas.



**Figura 5.** Equipe e tripulação da embarcação Comandante Araújo I responsável pela visita técnica pela Floresta Nacional do Pau-Rosa, na comunidade de São João do Cacoal, em setembro de 2021.

A embarcação partiu do município de Itacoatiara, estado do Amazonas e percorreu três dos quatro rios principais que banham a Flona: o Paraconí, o Parauari e o Amana. Especificamente no caso do rio Amana, a embarcação principal precisou ser ancorada na comunidade Monte Sinai e com uma lancha auxiliar, percorrer mais 2 horas ao longo do Rio Amana até a região chamada de Salto do Amana, divisa com o estado do Pará. As comunidades visitadas foram: Santa Maria do Caiuê, Fortaleza, Monte Carmelo, Bragança, Guadalupe, São João do Cacoal, São Tomé, Santa Tereza, Osório da Fonseca, Sagrado Coração de Jesus, Monte Sinai. Adicionalmente, em algumas localidades foram atendidos também moradores isolados, residentes às margens dos rios (Figura 6).



**Figura 6.** (A) Reunião com os comunitários para entrega de cestas básicas e; (B) entrega de cestas básicas para moradores isolados às margens do Rio Amana.

### 2.3. Análise da conjuntura ambiental atual

Durante a visita técnica, a equipe geralmente passava o dia inteiro em cada comunidade, onde a embarcação pernoitava e se deslocava para a próxima no dia seguinte. A região não recebe abastecimento de energia elétrica por linhas de transmissão, tornando necessário a utilização de geradores de energia abastecidos por gasolina ou diesel ligados assim que o sol se punha, por volta das 18h e depois desligados entre 22:00h e 00:00h. Nas comunidades não foram encontradas outras formas de geração mais sustentáveis, tais como energia solar fotovoltaica. Em algumas comunidades haviam antenas parabólicas que recebiam sinal da internet, sendo algumas privadas, onde o serviço era adquirido por um dos moradores e vendido por tempo de acesso aos demais. O que não é produzido pelos comunitários é comprado nas cidades mais próximas, como Maués e Nova Olinda do Norte, e ao se deslocarem, aproveitavam para acessar outros serviços, como médicos, bancários entre outros.

É inegável a íntima relação entre os habitantes e o meio ambiente, onde coexistem de forma harmônica na medida do possível, utilizando os recursos naturais essenciais para as suas necessidades básicas, de onde retiram a água para beber, cozinhar, higiene básica, pesca e lazer (Figura 7). Da mesma forma os solos, pois é onde cultivam e colhem os alimentos básicos de sua alimentação.





**Figura 7.** Momentos da visita técnica na Flona do Pau-Rosa: (A) comunitários descascando mandioca para produção de farinha e tucupi; (B) a analista do ICMBIO Jaqueline Gomes (à esquerda), um dos líderes comunitários mais antigo, Sr. Valinho (no centro) e a autora (à direita) na comunidade Santa Maria do Caiuê e; (D) crianças da comunidade de Guadalupe tendo um momento de lazer às margens do Rio Paraconi.

De todos os três rios principais percorridos, o que mais se apresenta potencialmente degradado fisicamente é o Rio Amana (Figura 8). Antes, conhecido por suas águas claras e cristalinas (relato dos comunitários da região), hoje encontra-se com águas turvas devido a alta concentração de sedimentos em suspensão (Figura 8 (A)), devido principalmente às atividades das dragas que aspiram o solo do fundo dos rios em busca do ouro (Figura 8 (B) e (C)). Conforme relato dos moradores, a largura do rio também vem sendo comprometida pelo assoreamento, onde vem se observando ao longo dos últimos anos a formação de inúmeras “praias” na extensão no rio, tanto às margens, como em regiões centrais (Figura 8 (D), (E) e (F)). É bem provável que em pouco tempo, embarcações medianas de transporte de carga e passageiros não consigam mais navegar pela região. Foi encontrado também uma grande área com desmatamento de mata ciliar, com rastro de escavadeiras de grande porte, região que naquele momento estava completamente abandonada (Figura 9).



**Figura 8.** Percurso pelo Rio Amana: Momentos da visita técnica na Flona do Pau-Rosa: (A) elevada turbidez das águas devido à alta concentração de sedimentos em suspensão; (B) e (C) dragas encontradas no Rio Amana, e; (D), (E) e (F), “praias” formadas às margens e no meio do Rio Amana ocasionada pelo funcionamento das dragas.



**Figura 9.** Área de desmatamento em mata ciliar do Rio Amana, utilizada para atividade de garimpo. Foto: Jacqueline Martins Gomes, analista do ICMBIO.

Na Amazônia, onde é comum o estabelecimento de garimpos de ouro (legais e ilegais), ocorre a geração de rejeitos contendo elevados teores de mercúrio metálico, conhecido popularmente como “azougue”. O mercúrio (Hg) é um elemento não essencial, classificado como metal pesado, que se apresenta na forma líquida em temperatura ambiente, solúvel em soluções oxidantes e possui um alto nível de toxicidade, prejudicial às plantas, animais e saúde humana. Esse metal é encontrado de forma natural no meio ambiente, ocorrendo no ar, no solo e na água, incorporado pela gaseificação da crosta terrestre, emissões vulcânicas e por evaporação natural dos corpos d’água. Nas últimas décadas a sua concentração vem aumentando consideravelmente por fatores antrópicos relacionados a atividades industriais e de mineração, correspondendo a aproximadamente 30% do que é emitido para a atmosfera. Dessa forma, devido à sua capacidade de atingir longas distâncias da fonte de poluição pelo transporte atmosférico, é considerado um poluente global (WANG et al., 2003; FLOREZ et al., 2015; ULLAH et al., 2015; BRITO et al., 2021).

Durante a viagem foi relatado pelos comunitários e depois confirmado em conversa com alguns trabalhadores do garimpo, que a visita técnica estava causando grande movimentação na Flona. Os rumores eram de que iria ser realizada uma grande operação de multa e apreensão nos garimpos envolvendo órgão governamentais como ICMBio, Polícia Federal e IBAMA. Isso ocorreu pelo fato de que na mesma época, a Polícia Federal estava realizando operações de combate ao garimpo ilegal na região do médio Amazonas, mais especificamente no rio Madeira. Devido a isso, durante o pernoite da embarcação na comunidade de Santa Clara, noite anterior à ida ao Salto do Amana, foi possível observar a saída de aproximadamente cinco dragas do rio Amana. No dia seguinte, ao chegar no salto do Amana, em um ponto de apoio dos trabalhadores do garimpo, a analista do ICMBIO, Jacqueline Gomes, informou que a missão principal da viagem era a entrega das cestas básicas, porém foi orientado firmemente sobre a ilegalidade da atividade de garimpo na região pertencente ao Estado do Amazonas e que a qualquer momento eles poderiam ser alvo de autuação.

E foi durante essa roda de conversa que ocorreu uma troca interessante de pontos de vistas. Se por um lado existe toda uma problemática ambiental sobre uso sustentável dos recursos naturais, por outro lado, os trabalhadores do garimpo afirmam que são como quaisquer outros trabalhadores comuns, que entendem que pode haver diversos impactos ambientais, no entanto, eles visam buscar o sustento de suas famílias. Isso pelo fato que as pessoas que mais lucram são os donos propriamente dito. Concluiu-se do diálogo, que realmente é uma questão complexa de ser resolvida, por inúmeros aspectos inclusive a necessidade de políticas públicas que ofereçam alternativas de renda para que esses trabalhadores possam abandonar essas atividades ilegais.

Em relação à visão dos moradores às margens do Rio Amana, foi possível constatar que não se utilizam de nenhum tratamento para melhorar a qualidade da água do rio antes do consumo e desconhecem a gravidade da ingestão da água e alimentos contaminados com mercúrio. Na realidade, a maioria mantém uma postura cética em relação à esta contaminação, comprovados por alguns relatos apresentados a seguir. A seguir, o registro de algumas das falas dos moradores que não serão identificados.

*(...) não acho que tenha mercúrio no rio e no peixe, eu nunca cortei peixe e encontrei mercúrio dentro.*

*(...) usa o mercúrio só quando queima o ouro, nunca vi jogando mercúrio dentro da água.*

Na primeira fala, observou-se o desconhecimento ao potencial de contaminação do mercúrio, uma vez que como não “se pode ver”, é considerado que não existe, tornando-se um mal silencioso. Na segunda fala reflete outro ponto de vista apresentado pelos moradores, sobre o fato de o mercúrio não ser despejado diretamente nos rios e nos solos, no entanto, é comprovado cientificamente que grande parte da contaminação do mercúrio é ocasionada pela volatilização do elemento no momento da queima da liga metálica com o ouro.

Quando questionados, se fossem feitas pesquisas que comprovassem a contaminação do mercúrio na água, no solo e/ou no pescado, qual seria a reação deles, a maioria já vive há muito tempo na região e não teriam interesse e nem oportunidade para se mudarem dali.

## 2.4. Conclusões

Por meio dessa visita técnica, pôde-se comprovar que a área mais potencialmente impactada ambientalmente foi à região Rio Amana, devido principalmente às atividades ilegais de garimpo do ouro. A questão é complexa pois se de um lado existe a necessidade do uso sustentável dos recursos naturais, do outro existem moradores da região necessitam exercer tal atividade para obter uma fonte de renda. Entende-se que é importante que haja um trabalho de educação ambiental de forma a fortalecer a cadeia produtiva de culturas regionais rentáveis, como o guaraná e o pau-rosa, para que se tornem atrativas a esses trabalhadores, funcionando como fonte de renda alternativa à atividade ilegal.

Diante desta análise, observa-se a necessidade do aumento de pesquisas que potencializem o desenvolvimento de culturas agrícolas de forma a torná-las rentáveis, aos mesmo tempo que sustentáveis. Dentre elas, pode-se citar estudos sobre as propriedades físico-hídricas do solo, com informações sobre o deslocamento de água e solutos no solo, permitindo assim a utilização correta de fertilizantes, sem torná-los mais um contaminante das águas e do solo.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade pelo apoio logístico, ao permitir a participação da autora na equipe da visita técnica e a todos os comunitários da Flona do Pau-Rosa pela troca de conhecimentos e experiências.

## Referências

- BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em: 4 abr 2023.
- BRASIL. Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007. Dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/11516.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11516.htm). Acesso em: 4 abr 2023.
- BRASIL. Decreto s/n, de 07 de agosto de 2001. Cria a Floresta Nacional de Pau-Rosa, no Município de Maués, Estado do Amazonas, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: [https://www.ICMBio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/2001/dec\\_sn\\_2001\\_uc\\_cria\\_floresta\\_nacional\\_pau\\_rosa\\_am.pdf](https://www.ICMBio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Decretos/2001/dec_sn_2001_uc_cria_floresta_nacional_pau_rosa_am.pdf). Acesso em: 4 abr 2023.
- BRITO, W. J. P.; HOLANDA, B. S.; MOREIRA, F. S.A.; SILVA, J. C. C.; FERNANDES, A. R. Mercúrio no meio ambiente: uma revisão sobre seus efeitos toxicológicos e as principais fontes de emissão. Revista DAE, v. 69, n.230, p. 127-139, 2021.

- FLOREZ, M. C. J.; OSPINA, L. F.V.; LÓPEZ, T. M. Fitorremediación de mercúrio a partir de *Elodea* sp. *Ingenierías USBMed*, v. 6, n. 2, p. 42-45, 2015.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Plano de manejo da Floresta Nacional do Amana: volume I - diagnóstico. Curitiba/PR: ICMBIO, 2010. 140 p.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Plano de manejo da Floresta Nacional de Pau-rosa: volume I - diagnóstico. Itacoatiara/AM: ICMBIO, 2018. 203p.
- TINÔCO, A. M. P.; AZEVEDO, I. C. A. D.; MARQUES, E. A. G.; MOUNTEER, A. H.; MARTINS, C. P.; NASCENTES, R.; REIS, E. L.; NATALINO, R. Avaliação de contaminação por mercúrio em Descoberto, MG.
- PEREIRA, N. Os índios Maués. 2ª ed. rev. Manaus: Editora Valer e Governo do Estado do Amazonas, 2003
- RADAMBRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Folha SB.21 Tapajós: geologia, geomorfologia, solos, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1975. 409 p.
- SANTOS, F. S.; SARAIVA, J. M. B.; ATROCH, A. L. Influência da precipitação fluvial na produtividade do guaraná no município de Maués, AM. *Agrometeoros*, v. 29, p. 1-13, 2021.
- SOUZA, R. T. Y. B.; MEDEIROS, D. O.; FERRAZ, R. A.; MAGALHÃES, F. R. Uma descoberta: alunos e servidores do IFAM Campus Itacoatiara conhecem a realidade do Rio Paraconi na Floresta Nacional do Pau Rosa. *Nexus - Revista de Extensão do IFAM*, n.10, p.167 – 179, 2020.
- ULLAH; S. HENG; M. F. HUSSAIN MUNIS; S. FAHAD; X. Yang. Phytoremediation of heavy metals assisted by plant growth promoting bacteria: a review. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 117, p. 28-40, 2015.
- WANG, D.; SHI, X.; WEI, S. Accumulation, and transformation of atmospheric mercury in soil. *The Science of the Total Environment*, n. 304, p. 209-214, 2003.

### 3. PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO DA FLORESTA NACIONAL DO PAU-ROSA, AMAZONAS, BRASIL

Lorena de Paula Cabral<sup>1</sup>, Jarbas Honorio de Miranda <sup>2</sup>, Gilmar Batista Grigolon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Profa. Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, AM, Brasil; <sup>2</sup>Prof. Associado 3, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil. <sup>3</sup>Técnico de Laboratório, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

#### Resumo

A determinação das propriedades físico-hídricas do solo mediante a curva de retenção de água no solo (CRA), bem como, a condutividade hidráulica no solo saturado (Ksat) são importantes ferramentas da agricultura no que se refere à dinâmica da água e dos solutos no solo, permitindo o melhor uso e conservação dos recursos naturais, principalmente no contexto de atividades realizadas em Unidade de Conservação. Diante disso, esse trabalho teve por objetivo realizar a caracterização físico-hídrica de um Latossolo Amarelo Distrófico da Floresta Nacional do Pau-Rosa, Amazônia, Brasil, para servir como base para estudos que vierem a ser realizados na região. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, na comunidade Lírio do Vale, ao lado da cachoeira do Salto do Amana, limite sudeste da Flona do Pau-Rosa com estado do Pará, na profundidade de 0 a 30 cm (deformadas) e nas profundidades de 0 - 20, 20 - 40 e 40 - 60 cm (indeformadas), em três repetições. A partir dessa coleta, foi realizada a análise físico-química do solo, a determinação da CRA e da Ksat. As CRAs foram ajustadas pelo software RETC, conforme o modelo de van Genuchten (1980) onde foram obtidos os parâmetros de ajuste do modelo ( $\lambda$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $m$  e  $n$ ). Pôde-se observar que houve pouca variação no comportamento físico hídrico entre as profundidades avaliadas. Observou-se que o solo apresentou elevada acidez (pH = 3,90) e baixa fertilidade, típico de Latossolos Amarelo amazônicos, com teores baixos de magnésio e potássio, teores muito baixos de cálcio e fósforo, teor médio de boro e alto de enxofre. Analisando os parâmetros da CRAs para as três diferentes profundidades do perfil, observou-se pouca variação do conteúdo de água entre elas, porém é provável que a camada superior possua maior teor na fração argila, pelo maior desempenho na retenção de água. O conteúdo de água de saturação ( $\theta_s$ ), que é numericamente igual à porosidade do solo ( $\alpha$ ), variou entre 0,4271 e 0,4533 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0-20 > 40 - 60 > 20 - 40 cm. O conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ) variou entre 0,0990 e 0,1058 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 40 - 60 > 0 - 20 cm. O parâmetro  $\lambda$  variou entre 0,661 e 0,0732, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 0 - 20 > 40 - 60 cm. O valor de  $n$  variou entre 1,5774 e 1,6812, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0 - 20 > 40 - 60 > 20 - 40 cm. Como  $m$  é calculado a partir do valor de “ $n$ ”, os valores seguiram a mesma tendência. O solo possui boa permeabilidade, representada pela condutividade hidráulica, classificada como moderada (Ksat = 4,15 cm h<sup>-1</sup>). Conclui-se que para aumento da produtividade das culturas agrícolas, em ascensão na região como o Guaraná da Amazônia, existe necessidade de correção da acidez do solo, bem como de adubação, tornando relevantes estudos sobre o movimento dos solutos neste solo, visto que a área pertence à uma Unidade de Conservação e os recursos devem ser utilizados de forma sustentável.

**Palavras-chave:** Curva de retenção de água no solo; modelo van Genuchten-Mualem, condutividade hidráulica.

#### Abstract

Determining soil physical-hydraulic properties through the soil water retention curve (SWRC) and hydraulic conductivity in saturated soil (Ksat) are vital tools in agriculture. These tools help understand water and solute dynamics in the soil, promoting better usage and conservation of natural resources, especially within Conservation Units. This study aimed to perform a physical-hydraulic characterization of the soil in the Pau-Rosa National Forest, Amazon, Brazil, to provide a foundation for related studies in the region. We collected deformed and undisturbed soil samples from the Lírio do Vale community, adjacent to the Salto do Amana waterfall, located on the southeastern boundary of the Pau-Rosa National Forest, bordering the state of Pará. The samples were collected from 0 - 30 cm in depth, with undisturbed samples collected from depths of 0 - 20, 20 - 40, and 40 - 60 cm, at three repetitions. From these samples, we performed soil physicochemical analysis, determined the SWRC, and measured Ksat in saturated soil. The

SWRC was fitted using the RETC software, according to the van Genuchten model (1980), where the model fitting parameters ( $\lambda$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $m$ , and  $n$ ) were obtained. We observed little variation in water behavior among the evaluated depths. The soil exhibited high acidity ( $\text{pH} = 3.90$ ) and low fertility, typical of Amazonian Udox, with low levels of magnesium and potassium, very low levels of calcium and phosphorus, medium levels of boron, and high levels of sulfur. Analyzing the SWRC parameters for the three different depth profiles revealed minimal variation in water content between them. However, the upper layer likely contains a higher clay fraction content, enhancing water retention. The saturation water content ( $\theta_s$ ), ranged from 0.4271 to 0.4533  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , following the decreasing order of values in the profiles 0-20 > 40-60 > 20-40 cm. The residual water content ( $\theta_r$ ) ranged from 0.0990 to 0.1058  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , following the decreasing order of values in the profiles 20-40 > 40-60 > 0-20 cm. The parameter  $\lambda$  ranged from 0.661 to 0.0732, following the decreasing order of values in the profiles 20-40 > 0-20 > 40-60 cm. The value of  $n$  ranged from 1.5774 to 1.6812, following the decreasing order of values in the profiles 0-20 > 40-60 > 20-40 cm. As  $m$  is calculated based on  $n$ , the values followed the same trend. The soil demonstrated good permeability, represented by moderate hydraulic conductivity ( $K_{\text{sat}} = 4.15 \text{ cm h}^{-1}$ ). It is concluded that for increasing productivity of agricultural crops, such as Amazonian Guaraná, which is gaining popularity in the region, there is a need to correct soil acidity and provide fertilizer recommendations. This underlines the relevance of studies on solute movement in this soil, considering the area belongs to a Conservation Unit and resources should be utilized sustainably.

**Keywords:** Soil water retention curve; van Genuchten-Mualem model, hydraulic conductivity.

### 3.1. Introdução

Ao estudar o fenômeno da retenção de água pelos solos, Libardi (2018) considera que o solo é um material natural, sólido e poroso. A matriz do solo, também denominada de esqueleto ou sólidos, é composta principalmente por partículas minerais e substâncias orgânicas de várias formas e tamanhos. O restante (parte não ocupada pela matriz) é denominado de espaço poroso que pode ser ocupado por quantidades variáveis de uma solução aquosa contendo vários eletrólitos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc) e outros compostos, denominado de água ou solução do solo e de uma fração gasosa, composta principalmente de  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , vapor d'água e quantidades pequenas de outros gases, denominada de ar do solo.

Em resumo, a água é retida pelos solos por dois processos. O primeiro refere-se à retenção que ocorre nos microporos dos agregados, referente ao fenômeno da capilaridade devido ao pequeno diâmetro desses poros. O segundo refere-se à adsorção, que consiste na retenção que ocorre nas superfícies dos sólidos do solo como filmes “presos” a ele. O conjunto dessas forças é denominada de força mátrica e dá origem ao potencial mátrico (LIBARDI, 2018).

Para entender como estimar o conteúdo de água no solo é importante o conhecimento prévio de algumas propriedades físico-hídricas importantes. Dentre elas, a textura e estrutura são de grande relevância, pois em conjunto podem ajudar a determinar não somente a quantidade de água que o solo pode armazenar, mas também os processos que envolvem a nutrição mineral de plantas. Outros parâmetros importantes que serão descritos, citados por Libardi (2018), são a densidade dos sólidos, densidade do solo, porosidade do solo e o conteúdo de água no solo.

A textura refere-se ao tamanho das partículas minerais, indicando as proporções dos diferentes tamanhos de partículas num determinado solo. O tamanho refere-se ao diâmetro de partículas que compõe cada uma das frações, em termos gerais, divididas em argila (partículas menores que 0,002 mm), silte (entre 0,002 e 0,02 mm) e areia (entre 0,02 e 2,00). Após a análise da distribuição de partículas, o solo é então enquadrado em uma das classes texturais. As partículas maiores formam o agregado inerte enquanto as menores, determinam a característica de retenção de umidade no solo, o que está relacionado ao tamanho da área da superfície específica. Já a estrutura refere-se aos arranjos formados da união das partículas para formar os agregados. Ou seja, macroporos são responsáveis pela circulação do

ar e a facilidade de absorção de água, enquanto os microporos agem no movimento da água e na retenção da umidade (EMBRAPA, 2002).

A densidade dos sólidos ( $\rho_s$ ), também conhecida como densidade de partículas ou densidade real, de uma amostra de solo é obtida pelo quociente entre a massa total e o volume total de sólidos da amostra. Como afirma Teixeira et al. (2017), essa propriedade está relacionada ao volume efetivamente ocupado pela matéria sólida, ou seja, desconta-se o volume vazio naturalmente encontrado nos solos, denominado de porosidade. Dessa forma, tem-se pela eq. 1 que:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

em que  $\rho_s$  é a densidade dos sólidos [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ],  $m_s$  é a massa de sólidos do solo [kg] e  $V_s$  é o volume de sólidos do solo [ $\text{m}^3$ ]. O método do balão volumétrico e método do picnômetro são algumas formas de obtê-la.

A densidade do solo ( $\rho$ ), também denominada de densidade global, considera o volume ocupado pelo espaço poroso, desconsiderado no cálculo da  $\rho_s$ . Dessa forma, visa medir a densidade média de um volume de solo conhecido, estando a densidade relacionada com a porosidade total e com a composição orgânica e mineralógica média do solo (TEIXEIRA et al., 2017; LIBARDI, 2018). Logo pela eq.2:

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a densidade do solo [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ],  $V$  é o volume do solo [ $\text{m}^3$ ]. O método do anel volumétrico, método do torrão, método da escavação e método da radiação gama, têm sido os mais correntes como afirma Libardi (2018).

A porosidade do solo ( $\alpha$ ) consiste em um índice que quantifica a fração do volume do solo ocupado pelos poros que pode ser obtido diretamente pela relação entre os volumes de poros e de solo (Equação 3) ou relacionando as densidades do solo e de partículas, deduzida pelas equações anteriores (Equação 4). Diante das equações, pode-se inferir que a porosidade se relaciona inversamente à densidade do solo (LIBARDI, 2018). Essa fração é passível de ser ocupada por água e/ou ar e é importantíssima para o entendimento do movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos (TEIXEIRA et al., 2017).

$$\alpha = \frac{V - V_s}{V} \quad (3)$$

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (4)$$

em que  $\alpha$  é a porosidade do solo [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ]. A porosidade pode ser expressa em termos de porcentagem, nesse caso o valor obtido é multiplicado por 100.

O conteúdo de água no solo pode ser expresso de duas maneiras. A primeira, à base de massa ( $U$ ), consiste na razão entre a massa de água que existe em uma amostra de solo num dado instante e a massa de sólidos da amostra, representada pela Equação 5. A segunda, à base de volume ( $\theta$ ), representa o volume de uma amostra de solo ocupada pela água em relação ao volume total da amostra de solo coletada, num determinado instante, podendo ser obtida pelas Equações 6 e 7.

$$U = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (5)$$



$$\theta = \frac{V_a}{V} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{m - m_s}{\rho_a V} \quad (7)$$

em que  $U$  é o conteúdo de água à base de massa [ $\text{kg kg}^{-1}$ ] e  $\theta$  é o conteúdo de água à base de volume [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ]. Da mesma forma que a porosidade, estes valores podem ser expressos em termos de porcentagem, bastando multiplicá-los por 100.

A Curva de Retenção de Água no Solo (CRA) é a principal ferramenta, utilizada para caracterizar fisicamente o solo e auxiliar em diversas aplicações de manejo hídrico, principalmente em projetos de irrigação, hidrologia, engenharia geotécnica e Ciência do Solo em geral (TOO et al., 2014). Esta ferramenta funciona de forma eficiente no manejo adequado da irrigação, permitindo o cálculo da quantidade de água a ser aplicada de forma mais aproximada a necessidade, permitindo ganhos econômicos e conservação e manejo do solo, bem como o uso racional da água. Ainda sobre o aspecto ambiental, é importante ressaltar que é na solução do solo, que encontram substâncias que podem funcionar ou não como contaminantes, então conhecer os parâmetros da CRA auxilia também no estudo do movimento desses contaminantes no solo, pois servem como dados de entrada para alguns modelos matemáticos que descrevem o descolamento miscível de diferentes solutos no solo.

Libardi (2018) define a CRA como um parâmetro de natureza física que relaciona o conteúdo de água e o potencial mátrico ( $\Psi_m$ ), variando no espaço e no tempo, que auxilia na obtenção de outros parâmetros hidráulicos do solo. Em outras palavras, é a representação entre a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e a energia com o qual as partículas minerais ou orgânicas do solo retêm a água. Marshall et al. (1996) afirmam que o  $\Psi_m$  é resultante do somatório da adsorção que retêm a água nas partículas do solo e da capilaridade que retêm a água nos poros entre as partículas e entre os agregados de partículas no solo.

Melo et al. (2015) complementam que a CRA depende das diferentes propriedades inerentes a cada tipo de solo como a granulometria, teor de matéria orgânica e composição mineralógica e de condições como o volume e a distribuição e vazios, micro e macroestrutura, microfissuras, pH, composição da fase líquida, temperatura, dentre outros. Pessoa (2020), ressalta que a CRA, juntamente com a condutividade hidráulica do solo, são importantes variáveis para compreender os parâmetros físico-hídricos do solo.

Algumas aplicações importantes da CRA são: determinação do índice de água disponível no solo, visando classificá-lo de acordo com a finalidade de uso, como por exemplo, para irrigação ou construção civil; determinação do espaço poroso drenável (espaço poroso efetivo, porosidade efetiva, rendimento específico) para projetos de drenagem; verificar alterações na estrutura de um solo, causadas pelo plantio, mistura de camadas e; verificar a relação entre a tensão da água no solo e outras propriedades físicas do solo, como a capilaridade, condutividade hidráulica, teor de argila, teor de matéria orgânica entre outros (TOO et al., 2014).

Alguns dos equipamentos utilizados para obter pares de pontos de umidade volumétrica e potencial mátrico são o funil de Haines, a mesa de tensão, a câmara de pressão e mais recentemente o método da centrífuga. Ao ajustar a CRA aos modelos usados para descrevê-la, quanto maior o número de pontos, maior a sua representatividade, no entanto, mais caro e demorado é o levantamento. O tempo de obtenção dos pontos varia por diversos fatores, um exemplo prático consiste no efeito da textura no tempo de obtenção dos pares de pontos, uma vez que quanto mais argiloso é o solo, maior é quantidade de material coloidal e com grande porcentagem de microporos, com consequente

maior superfície específica, dessa forma possuem maior capacidade de reter água em relação aos solos mais arenosos, resultando em um tempo maior para obtenção da sua CRA, em média 3 a 4 meses (SILVA, 2015).

Grigolon (2013), afirma que apesar da importância, a determinação da CRA costuma ser um processo oneroso e demorado, o que faz com que os produtores desistam de realizar a análise. Pensando nisso, o mesmo autor desenvolveu um estudo visando definir o menor número e a melhor combinação de pares de umidade e tensão de água no solo, para determinar uma CRA de forma confiável. Como resultado, foi possível inferir que uma CRA elaborada com 7 pontos, elaborada com as tensões 0, 40, 100, 300, 1000, 5000 e 15000 hpa, obteve um desempenho satisfatório quando comparada com uma CRA padrão, contendo 13 pontos.

Silva (2015) afirma que alguns modelos empíricos foram criados para estabelecer uma relação entre o teor de umidade e os potenciais exercidos na matriz do solo como Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980), Durner (1994), Kosugi (1996) e Kastanek e Nielsen (2001). Dentre eles, o modelo de van Genuchten (1980) (Equação 8) destaca-se pela sua extensa utilização e consiste em uma equação matemática composta por duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo que correspondem à saturação ( $\theta_s$ ) e ao conteúdo residual ( $\theta_r$ ) e um ponto de inflexão entre os platôs, no qual depende dos atributos do solo, sendo sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo ( $\lambda$ ,  $n$  e  $m$ ) (MELO et al., 2015).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\lambda|\Psi_m|)^n]^m} \quad (8)$$

em que  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo, [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ];  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são a umidade volumétrica na saturação e umidade residual do solo, respectivamente, [ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ];  $|\Psi_m|$  é o potencial mátrico da água no solo, [hPa];  $\lambda$  é um parâmetro de ajuste do modelo, [ $\text{hPa}^{-1}$ ] e;  $m$  e  $n$  são também parâmetros de ajuste do modelo, porém adimensionais.

A umidade volumétrica de saturação ( $\theta_s$ ) corresponde ao ponto da curva em que a tensão é igual a zero; a umidade residual ( $\theta_r$ ) pode ser considerada como um parâmetro de extrapolação e, portanto, representar a menor umidade possível em um solo;  $\lambda$  é um parâmetro cujo seu inverso pode referir-se ao valor de entrada de ar ou pressão de borbulhamento, e;  $n$  associa-se à distribuição do tamanho de poros que afeta a inclinação da função de retenção (SILVA et al., 2006 apud SILVA, 2015)

Van Genuchten et al. (1991) buscando encontrar um ajuste mais eficiente para descrever a CRA desenvolveram um software denominado de RETC, composto por 12 modelos analíticos. O objetivo principal do RETC consiste em ajustar uma equação que minimize a soma dos quadrados dos resíduos do modelo utilizado pelo usuário. Em resumo, é realizado uma aproximação linear pelos mínimos quadrados, estimando os parâmetros desconhecidos do modelo a partir de dados observados de retenção e/ou de condutividade do solo não saturado. Dessa forma, esta aproximação baseia-se na partição da soma total dos quadrados dos resultados em torno dos previstos no modelo (SILVA, 2015).

Segundo Libardi (2018) é importante se atentar ao fato de que dependendo da forma em que a CRA foi obtida, pode haver mais de uma curva que relaciona o potencial mátrico com a umidade volumétrica e que não se sobrepõe. Existe duas formas de obtenção da CRA, por dessorção (secamento) e por sorção (umedecimento). Na primeira, a amostra é saturada com água e em seguida submetida a sucções cada vez maiores. Na segunda, a amostra é primeiramente seca e depois realizado o seu umedecimento gradual mediante a redução da tensão. Essa diferença entre as curvas de molhamento e secamento é chamada de histerese.

A condutividade hidráulica do solo ( $K$ ) é um dos principais fatores que caracterizam o movimento de fluxos no solo e representa a capacidade com que o solo transmite a água. O máximo valor de  $K$  é atingido quando o solo se encontra em condição de saturação, nesse caso é denominado de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ )

(REICHARD, 1990). A partir da  $K_{sat}$ , pode-se por modelos matemáticos, determinar a condutividade hidráulica, obtendo-se informações a respeito não somente sobre a capacidade de transporte de água, mas de solutos e outras substâncias químicas, servindo como base nos cálculos de fluxos no solo. Alguns processos importantes na agricultura relacionados a esse fluxo são a infiltração da água no solo, projetos de irrigação e drenagem, perdas de fertilizantes e de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação. O estudo desses processos permite uma melhor utilização dos recursos de água e solo (MESQUITA e MORAES, 2004).

MESQUITA e MORAES (2004) afirmam que a condutividade hidráulica saturada é determinada pela geometria e pela continuidade dos poros preenchidos por água, dessa forma, depende do formato, da quantidade, da distribuição e da continuidade deles, tornando essa variável mais dependente da estrutura do que da textura do solo.

Diante desses aspectos, o objetivo desse trabalho reside na obtenção das características físico-hídricas e químicas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, unidade de conservação sob a gestão do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, visando servir como uma contribuição a estudos futuros que envolvam a modelagem nos processos de movimento de água e solutos no solo que venham a ser realizados na região.

## 3.2. Material e Métodos

### 3.2.1. Localização da área e amostragem do solo

As amostras de um Latossolo Amarelo Distrófico foram coletadas na comunidade Lírio do Vale, ao lado da cachoeira do Salto do Amana, limite sudeste da Flona do Pau-Rosa com estado do Pará. Foram escolhidos três pontos de coleta, considerados como repetições para cada potencial (Tabela 1).

**Tabela 1.** Coordenadas geográficas das amostras de solo coletadas.

Ponto de coleta	Coordenadas Geográficas	
	Latitude	Longitude
Amostra 1 (A1)	4°23'51.73"S	57°28'16.51"O
Amostra 2 (A2)	4°44'9.23"S	57°29'17.04"O
Amostra 3 (A3)	4°44'9.70"S	57°29'17.23" O

Uma trincheira com aproximadamente 0,3 m de profundidade, 0,5 m de largura e 0,5 m de comprimento, foi aberta com o auxílio de uma “boca de lobo”, nessa primeira etapa, todo o solo extraído foi coletado em sacos plásticos (amostras deformadas) com o auxílio de uma pá (Figura 10 (A) e (B)). Em seguida, após aprofundar a trincheira por mais 0,3 m com o perfil do solo em evidência, foram coletados anéis cilíndricos com diâmetro de 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura no centro das faixas de profundidade de 0-0,20 m; 0,20-0,40 m e; 0,40-0,60 m, para a extração das amostras indeformadas (Figura 10 (C)). Os anéis foram cravados com o auxílio de uma marreta, um anel auxiliar e um vibrastop, de forma a evitar qualquer tipo de compactação no solo coletado. E por fim, foram cravados mais 3 anéis de pvc de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura para obtenção da condutividade hidráulica em solo saturado ( $K_{sat}$ ), densidade do solo ( $\rho$ ) e cálculo da porosidade ( $\alpha$ ). Em laboratório, com o auxílio de um trado, foi extraído amostras do centro do anel de pvc visando garantir a confiabilidade das amostras.

Todos os anéis foram identificados, embalados em papel alumínio e depois acondicionados em sacos plásticos. Posteriormente, parte das amostras foi transportada por via aérea para o laboratório de Física do Solo, do Departamento de Engenharia de Biosistemas, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, onde foi realizada a elaboração das CRAs. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017).



**Figura 10.** Etapas da coleta de solo na Flona do Pau-Rosa, nas margens da região populamente conhecida como “Salto do Amana”: (A) abertura do perfil de solo para a coleta das amostras deformadas com o auxílio de uma boca de lobo; (B) coleta das amostras e sacos plásticos com o auxílio de uma pá e, (C) coleta das amostras indeformadas com os anéis metálicos.

As amostras deformadas foram transportadas para o Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, onde foram destorroadas e passadas pelo processo de tamisação em uma peneira de malha de 2,0 mm de abertura e em seguida, secas em ao ar, para a obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar). Após o processo de secagem, 500g de amostra composta foi utilizada para a caracterização físico-química.

### 3.2.2. Análise físicas e químicas do solo

A análise química do solo pode ser conferida pela Tabela 2, constando as seguintes informações: acidez ativa (pH); acidez potencial (H+Al); alumínio (Al); cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T); capacidade de troca de cátions efetiva (t); potássio (K); fósforo (P); enxofre (S); boro (B); Sódio (Na); matéria orgânica (MO); tampão SMP (pHSMP); condutividade elétrica (CE) e fósforo remanescente (Prem). As classes de interpretação e metodologias de pH, S e B seguem Raij et al. (1997). As demais classes de interpretação, exceto CE, seguem Ribeiro et al. (1999).

**Tabela 2.** Características químicas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, na camada de 0 a 30 cm de profundidade.

Prof (cm)	pH	H+Al	Al	Ca	Mg	SB	T	t	K
	CaCl <sub>2</sub>	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							mg dm <sup>-3</sup>
0-30	● 3,90	● 6,43	● 1,30	● 0,20	● 0,20	● 0,46	● 6,89	● 1,76	● 16,00
Prof (cm)	P	S	B	Na	MO	pHSMP	CE	Prem	
	mg dm <sup>-3</sup>				dag kg <sup>-1</sup>	-	dS m <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-3</sup>	
0-30	● 5,00	● 19,00	● 0,24	4,00	● 1,46	5,60	0,061	23	
Classes de interpretação		● Muito Alto	● Alto		● Médio		● Baixo	● Muito baixo	

Pela Tabela 3, podem ser conferidas as seguintes características físicas do solo: densidade do solo ( $\rho$ ); densidade de partículas ( $\rho_s$ ); condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat); umidade atual (U); porosidade; teores de areia, silte e argila, e por fim, a classe textural baseada no Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2018).

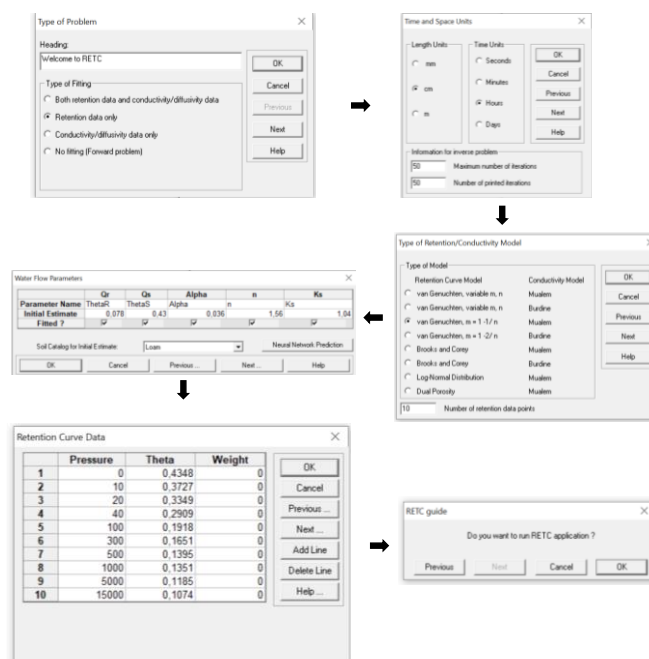
**Tabela 3.** Características físicas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, na camada de 0 a 30 cm de profundidade

$\rho$	$\rho_s$	U	Porosidade	Areia	Silte	Argila	Textura
g/cm <sup>3</sup>							-
1,44	2,17	8,26	33,64	72,4	10,8	16,8	Média-arenosa

### 3.2.3. Obtenção e modelagem da Curva de Retenção de Água no Solo – CRA

As amostras com estrutura indeformadas foram submetidas a diferentes tensões e coletados os valores de umidade volumétrica, para cada faixa de profundidade coletada: 0-0,20 m; 0,20-0,40 m e; 0,40-60 m. Foram coletados nove pontos para cada curva, utilizando-se da mesa de tensão para as tensões de 0 (saturação), 10, 20, 40 e 100 hPa e da câmara de Richards (KLUTE, 1986) para as tensões de 300, 500, 1000, 5000 e 15000 hPa. Para a elaboração e ajuste das curvas de retenção de água no solo, foi calculada as médias da umidade com base em volume ( $\theta$ ) das três repetições das amostras à mesma profundidade (A1, A2 e A3).

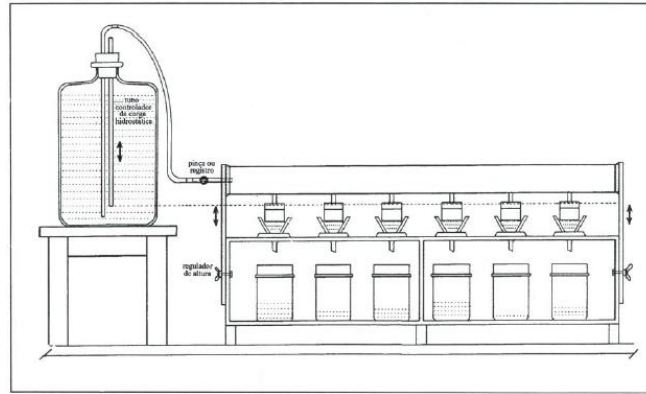
Esses dados foram utilizados para ajuste em relação ao modelo de Van Genuchten (1980) (Equação 1), considerando a restrição de Mualem (1976). O processo de calibração de um modelo matemático consiste no ajuste de alguns de seus parâmetros, visando representar de forma adequada o fenômeno em estudo, de forma coerente com a realidade observada. Para isso, utilizou-se do software RETC, conforme as etapas detalhadas a seguir (Figura 11). O produto gerado pelo software consiste em um relatório contendo uma comparação entre os dados observados e os dados preditos, bem como, a expressão gráfica da relação do potencial mátrico com o conteúdo de água no solo e por fim, os parâmetros de ajuste calculados.



**Figura 11.** Etapas executadas no software RETC para realizar o ajuste da curva de retenção de água no solo.

### 3.2.4. Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica, ou seja, a relação entre a carga e a velocidade com que a água se movimenta no solo, foi estimada pelo método do permeâmetro de carga constante (KLUTE, 1965) (Figura 12). Primeiramente as amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade com água deionizada e mantidas em repouso por 48h para a remoção das bolhas de ar presentes no solo. Em seguida aplicou-se uma lâmina d'água na superfície da amostra até atingir a saturação. Em seguida, coletou-se o volume durante um determinado tempo, em triplicata.



**Figura 12.** Diagrama do permeâmetro de carga constante. Fonte: Teixeira et al (2017).

De posse desses dados realizou-se a relação entre o volume percolado pela área da seção transversal da amostra e aplicou-se a equação de Darcy – Buckingham (Equação 9), para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ).

$$K_{sat} = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (h + L)} \quad (9)$$

em que  $Q$  é o volume do percolado durante o tempo  $t$  ( $\text{mL T}^{-1}$ ),  $L$  é a altura da amostra de solo (cm),  $h$  é o potencial de pressão que corresponde à carga hidráulica no topo da amostra (cm),  $A$  é a área da seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.2.5. Análise estatística

De posse do conjunto de  $n$  dados observados ( $O_i$ ) e do conjunto correspondente de dados simulados (preditos) ( $P_i$ ), foi realizada uma comparação de semelhança entre os dois através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 10).

O  $R^2$  representa a fração da variância total nos dados observados explicada pelo modelo. O resultado da análise é um valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a concordância entre a observação e o modelo (LEGATES; MCCABE JR, 1999).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right\}^2 \quad (10)$$

### 3.3. Resultados e Discussão

Os valores de conteúdo de água ( $\theta$ ) e os respectivos potenciais mátricos ( $\Psi_m$ ) aplicados às amostras de solo da Flona do Pau Rosa de 0 a 20 cm, de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm de profundidade, podem ser conferidos pela Tabela 4. Como cada ponto de amostra denominados de A1, A2 e A3 foram considerados como repetições, para fins de ajuste da curva de retenção de solo pelo modelo de van Genuchten (1980) (Equação 8), considerando a restrição de Mualem (1976), a umidade com base em volume considerada ( $\theta$ ) foi a média das três amostras retiradas na mesma profundidade.

**Tabela 4.** Valores de conteúdo de água ( $\theta$ ) e os respectivos potenciais mátricos ( $\Psi_m$ ) aplicados às amostras de solo da Flona do Pau Rosa de 0 a 20 cm, de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm de profundidade.

$\Psi_m$ (hPa)	Umidade com base em volume ( $\theta$ )											
	Profundidade de 0-20 cm				Profundidade de 20-40 cm				Profundidade de 40-60 cm			
	A1	A2	A3	Média	A1	A2	A3	Média	A1	A2	A3	Média
<b>0</b>	0,4388	0,4915	0,4505	<b>0,4602</b>	0,4034	0,4235	0,4762	<b>0,4344</b>	0,4713	0,3993	0,4339	<b>0,4348</b>
<b>10</b>	0,3771	0,3927	0,3890	<b>0,3863</b>	0,3827	0,3567	0,3346	<b>0,3580</b>	0,3744	0,3592	0,3843	<b>0,3727</b>
<b>20</b>	0,3356	0,3246	0,3401	<b>0,3334</b>	0,3566	0,3261	0,2942	<b>0,3256</b>	0,3221	0,3351	0,3474	<b>0,3349</b>
<b>40</b>	0,3005	0,2899	0,3097	<b>0,3000</b>	0,3223	0,2995	0,2661	<b>0,2960</b>	0,2860	0,2708	0,3160	<b>0,2909</b>
<b>100</b>	0,1726	0,1541	0,1889	<b>0,1719</b>	0,2039	0,1980	0,1566	<b>0,1862</b>	0,1891	0,1637	0,2227	<b>0,1918</b>
<b>300</b>	0,1548	0,1310	0,1508	<b>0,1455</b>	0,1736	0,1734	0,1388	<b>0,1619</b>	0,1645	0,1394	0,1915	<b>0,1651</b>
<b>500</b>	0,1279	0,1158	0,1364	<b>0,1267</b>	0,1477	0,1505	0,1163	<b>0,1382</b>	0,1386	0,1184	0,1613	<b>0,1395</b>
<b>1000</b>	0,1249	0,1105	0,1326	<b>0,1227</b>	0,1426	0,1449	0,1118	<b>0,1331</b>	0,1320	0,1155	0,1578	<b>0,1351</b>
<b>5000</b>	0,1160	0,0995	0,1215	<b>0,1123</b>	0,1275	0,1425	0,0979	<b>0,1226</b>	0,1161	0,1028	0,1367	<b>0,1185</b>
<b>15000</b>	0,1079	0,0886	0,1087	<b>0,1018</b>	0,1107	0,1395	0,0877	<b>0,1126</b>	0,1052	0,0922	0,1248	<b>0,1074</b>

Observando os valores de conteúdo de água no solo, é provável que a camada superior (0 – 20 cm) possua uma maior quantidade de fração de argila em relação às demais. EMBRAPA (2002) afirma que solos mais arenosos apresentam uma maior quantidade de macroporos, logo baixa capacidade de retenção de água, enquanto os mais argilosos, são ricos em microporos, tendendo a reter mais umidade. Isso pode estar relacionado com a superfície específica, onde em solos mais argilosos, por conterem partículas menores, apresentam maior área na superfície das partículas sólidas para reagir na absorção de água e/ou com os solutos no solo.

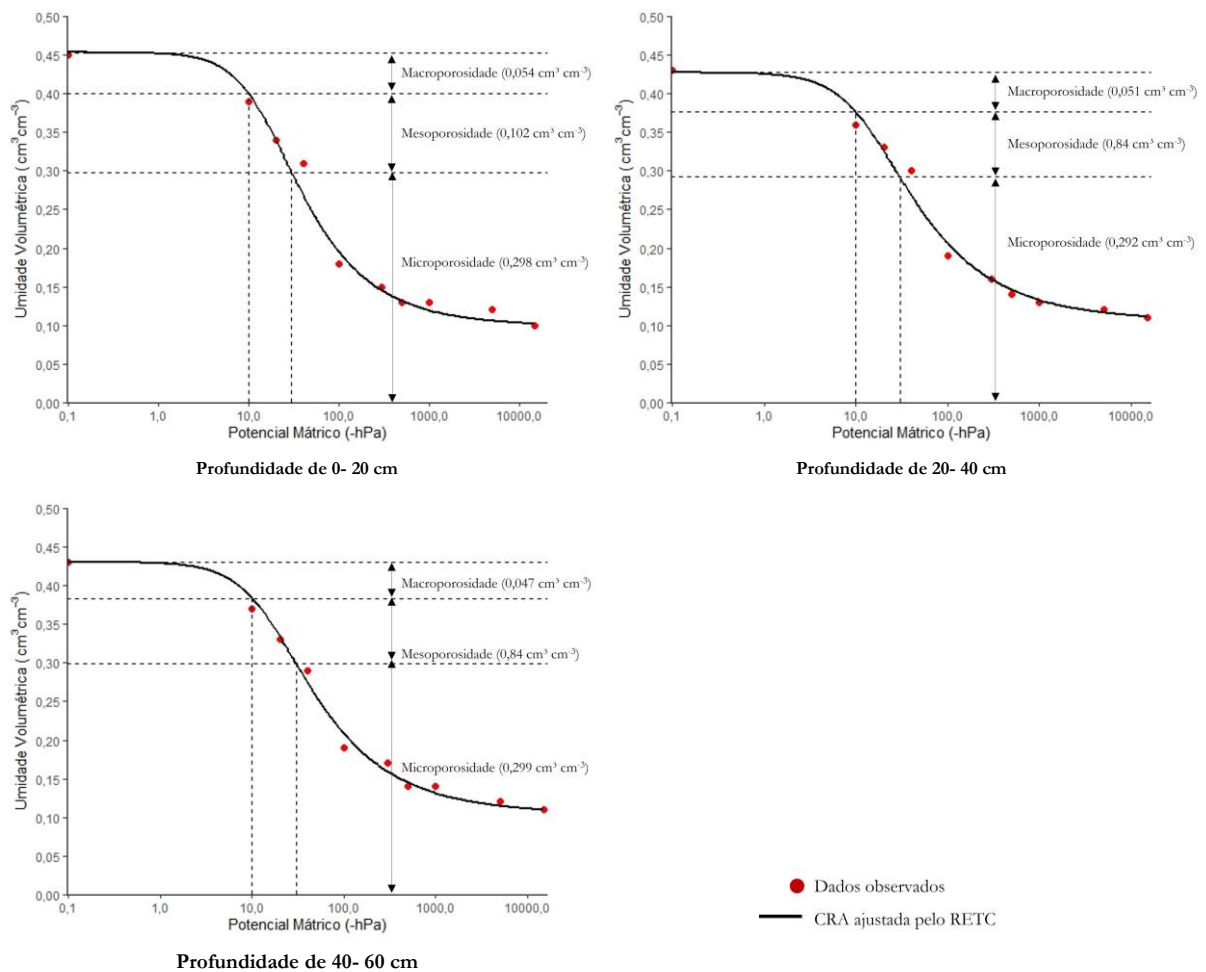
Pela Tabela 5 podem ser conferidos os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980), considerando a restrição de Mualem (1976) obtidos após os ajustes da CRA: conteúdo de água no solo saturado ( $\theta_s$ ), conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ), e os parâmetros empíricos de ajuste do modelo ( $\lambda$ ,  $n$  e  $m$ ). E por fim, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), onde pode-se observar que todas as CRAs apresentaram coeficientes maiores que 0,98, indicando que representaram de forma satisfatória o comportamento da água na matriz do solo.

**Tabela 5.** Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980), considerando a restrição de Mualem (1976) obtidos após os ajustes da CRA.

Profundidade da amostra (cm)	Parâmetros da curva de retenção (Van Genuchten, 1980) *					R <sup>2</sup>
	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	$\theta_r$	$\lambda$	$m$	$n$	
0 - 20	0,4533	0,0990	0,0662	0,4052	1,6812	0,988
20 - 40	0,4271	0,1058	0,0732	0,3660	1,5774	0,987
40 - 60	0,4303	0,1044	0,0661	0,3730	1,5950	0,994

$$*m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1$$

Pela Figura 13, podem ser conferidas as representações gráficas das CRAs correspondentes a cada profundidade tendo como abscissa os valores de tensão da água no solo ( $\Psi_m$ ), variando de 0 a 15000 cm.c.a e como ordenada o conteúdo de água no solo base de volume ( $\theta$ ) que variou de 0,460 a 0,102 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para profundidade de 0-20 cm, de 0,434 a 0,113 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para profundidade de 20 a 40 cm e de 0,435 a 0,107 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a profundidade de 40- 60 cm.



**Figura 13.** Curvas de Retenção de Água de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa): profundidade de 0 – 20 cm; profundidade de 20 – 40 cm, e; profundidade de 40 – 60 cm.



Ao se analisar as CRAs conjuntamente aos parâmetros contidos na Tabela 5, foi possível observar que houve pouca variação nas diferentes profundidades avaliadas. O conteúdo de água de saturação ( $\theta$ ), que é numericamente igual à porosidade do solo ( $\alpha$ ), variou entre 0,4271 e 0,4533  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0-20 > 40 – 60 > 20 -40 cm. O conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ) variou entre 0,0990 e 0,1058  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 40 – 60 > 0 - 20 cm. O parâmetro  $\lambda$  variou entre 0,661 e 0,0732, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 0 – 20 > 40 - 60 cm. O valor de  $n$  variou entre 1,5774 e 1,6812, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0 - 20 > 40 – 60 > 20 - 40 cm. Como  $m$  é calculado a partir do  $n$ , os valores seguiram a mesma tendência.

De acordo com Klein e Klein (2015) a classe textural do solo é um dos principais fatores na variação do armazenamento de água ao longo do perfil, pelo fato de determinar o tamanho das partículas em cada uma das camadas do solo. No entanto, neste estudo não houve grande variação nesse aspecto.

Neste estudo, utilizou-se apenas um tipo de solo o que pode explicar essa baixa variação. Geralmente grandes variações ocorrem quando são comparados diferentes tipos de solo, devidas a características inerentes a cada um como a textura, a estrutura, distribuição dos macroporos e microporos provenientes de suas frações de areia, silte e argila (COSTA, 2010). Conforme a classificação do tamanho de poros proposta por Koorevar (1983) temos que os macroporos são poros com raio maior que 50  $\mu\text{m}$ , mesoporos são poros de raio entre 15 e 50  $\mu\text{m}$  e os microporos são poros com raio menor que 15  $\mu\text{m}$ . Dessa forma, considerando a equação da capilaridade em que:

$$|\Psi_m| = \frac{2\sigma}{\rho_a g r} \quad (11)$$

Pode-se relacionar o potencial mátrico com o raio equivalente, como descreve Libardi (2018), sendo importante ressaltar que isto não significa quantificar o tamanho real do poro e sim uma aproximação da distribuição do conteúdo de água nos diferentes tipos de solo. Dessa forma, considerando a classificação de Koorevar (1983) e a Equação 11, tem-se que a microporosidade corresponde a valores de conteúdo de água correspondentes a tensões inferiores a 10 hPa, os valores de mesoporosidade corresponde a tensões entre 10 e 30 hPa e a microporosidade a tensões superiores a 30hPa (Figura 13).

Em relação à condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), foi considerado apenas o perfil de 0 a 20 centímetros, por se tratar da faixa de aplicação dos nutrientes pelos produtores, em três pontos de coleta, considerados como repetições e obteve-se como valor médio do  $K_{sat} = 4,15 \text{ cm h}^{-1}$ , classificado por Ferreira (1999) como “moderada”. Vale ressaltar que foram utilizadas amostras indeformadas, ou seja, o espaço poroso foi mantido o mais próximo do natural. Quando consideramos amostras deformadas, como apresentados no capítulo III desse trabalho, onde foram utilizadas para elaboração de curvas de distribuição de efluentes, o valor médio subiu para  $K_{sat} = 22,733 \text{ cm h}^{-1}$ , sendo classificada como “rápida”. O que já era esperado, já que o espaço poroso é totalmente diferenciado ao acomodarmos o solo manualmente em uma coluna de solo do que é naturalmente encontrado no meio ambiente.

### 3.4. Conclusões

O solo da Flona do Pau-Rosa analisado neste estudo apresentou elevada acidez e baixa fertilidade em termos gerais, considerando os elementos quantificados. Apresenta boa permeabilidade representada pela condutividade hidráulica considerada como moderada. As CRAs das diferentes profundidades foram bem aproximadas, porém é

possível inferir que a camada superior (0-20 cm) apresenta uma textura com maior teor da fração argila, devido ao melhor desempenho de retenção de água, quando comparada com as demais.

Diante das considerações, é provável que para aumento da produtividade das culturas agrícolas haja necessidade de correção da acidez do solo, bem como a recomendação de adubação de elementos essenciais, sendo imprescindíveis estudos futuros sobre o movimento dos solutos no solo, visto que a área pertence à uma Unidade de Conservação e os recursos devem ser utilizados de forma sustentável.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), especialmente à analista Jacqueline Gomes, pelo apoio logístico, nas coletas das amostras de solo e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudos. Ao técnico do Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP Gilmar Grigolon, pelo apoio na elaboração das CRAs.

## Referências

- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper, v. 3, 1964.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resources Research, v. 30, n.2, p. 211-223, 1994.
- COSTA, C. D. O. Escoamento superficial e risco de erosão do solo na sub-bacia Jardim Novo Horizonte, Município de Ilha Solteira – SP. 2010. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, 2010.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Água Disponível do Solo: Algumas características Físicas do Solo Importantes para Quantificação. Documento, 67. Porto Velho: Embrapa – CPAF, 2002. 18p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 355 p.
- FERREIRA, P. A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p.
- GRIGOLON, G. B. Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.
- KASTANEK, F. J.; NIELSEN, D. R. Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. Soil Science Society of America Journal, v. 65, n. 2, p. 279 – 283, 2001.
- KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 1, p. 21 – 29, 2015.
- KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Klute, A. Ed., Methods of Soil Analysis – Part 1 – Physical and Mineralogical Methods, American Society of Agronomy, Madison, p. 687 – 734, 1986.
- KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resources Research, v. 32, p. 2697-2703, 1996.mel

- KLUTE, A. Laboratory Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Soil. In Black, C. A (ed). *Methods of Soil Analysis: Physical and mineralogical Properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison, American Society of Agronomy, p. 253 – 261. 1965.
- LEGATES, D.R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35:233-241, 1999. 352 p.
- LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018.
- MARSHALL, T.J.; HOLMES, J.W.; ROSE, W.C. *Soil Physics*. Londres: Cambridge University Press, 1996. 453 p.
- MELO, T. M.; BRETANHA, S. S. F.; PEREIRA, M.; CASTRO, N. M. R.; LOUZADA, J. A. S.; OLIVEIRA, M. H. C. Comparação de Modelos para Determinação Indireta da Curva de Retenção de Água no Solo: Aplicação em Solos da Bacia do Arroio Taboão, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 3, p. 571-582, 2015.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência da condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, n.3, p. 513 – 522, 1976.
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 2ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p.
- REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990. 188p.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. 5. Aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999. 360 p.
- SILVA, A. C. *Modelos de pedotransferência aplicados na simulação das funções hidráulicas e da variabilidade espacial do solo*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.41, p.323-330, 2006.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.
- TOO, V. K.; OMUTO, C. T.; BIAMAH, E. K.; OBIERO, J. P. Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness. *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 4, p. 173 – 182, 2014.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-897, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. LEIJ, M.T.; YATES, F. J. *The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California. 1991.

## 4. PARÂMETROS DE TRANSPORTE DOS ÍONS NITRATO, FOSFATO E POTÁSSIO EM UM SOLO DA FLORESTA NACIONAL DO PAU-ROSA, AMAZONAS, BRASIL

Lorena de Paula Cabral<sup>1</sup>, Jarbas Honorio de Miranda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, AM, Brasil; <sup>2</sup>Prof. Associado 3, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

### Resumo

A adubação é uma técnica da agricultura que visa fornecer os nutrientes necessários e de forma equilibrada para o crescimento e desenvolvimento da cultura de interesse almejando-se o incremento de produtividade. A aplicação na lavoura, quando delimitada adequadamente, utiliza somente a quantidade necessária e com técnicas que permitam a manutenção do fertilizante, no maior tempo possível, disponível na zona radicular para que as plantas possam absorvê-lo. Quando se considera que a área em questão pertence a Unidades de Conservação, onde por lei, os habitantes precisam utilizar os recursos de forma mais sustentável, surge a importância de estudos sobre o comportamento do deslocamento dos íons (solutos) provenientes destes fertilizantes do solo, tornando-se uma eficiente ferramenta para gestores ambientais. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar os parâmetros de transporte dos íons nitrato, fosfato e potássio em um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, visando o cultivo sustentável da cultura do Guaraná, que vem sendo estimulada na região pelo ICMBio, como alternativa de renda a atividades ilegais realizadas na região. Para tal, foram elaboradas *Breakthrough Curves* (BTC's) (Curvas de Distribuição de Efluentes) para a obtenção dos parâmetros de transporte, mediante o ajuste numérico da equação diferencial de advecção-dispersão (ADE) que descreve a dinâmica dos solutos no solo. O ajuste foi realizado com o auxílio do código CFITIM do software STANMOD (*Studio of ANalytical MODels*), que retorna os valores de número de Peclet (P) e fator de retardamento (R) juntamente com o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) entre os dados observados e os dados modelados. De posse desses parâmetros, foram calculados o coeficiente de dispersão (D) e a dispersividade e em seguida elaborada a representação gráfica das BTCs. Considerando o uso sustentável dos recursos naturais de áreas protegidas como a Floresta do Pau-Rosa, diante dos resultados obtidos, notou-se que o íon mais susceptível a lixiviação no solo de estudo é o  $\text{NO}_3^-$  seguido pelo íon  $\text{K}^+$  e por fim, o  $\text{PO}_4^{3-}$ . Atualmente os moradores da região não realizam adubação do guaraná, que é plantado sem tratos culturais específicos. Em termos práticos, o fertilizante fosfato monopotássico apresentou maior tempo de permanência no solo, ficando disponível às plantas e menores riscos de contaminação por lixiviação.

**Palavras-chave:** dinâmica de solutos, deslocamento miscível, conservação ambiental.

### Abstract

Fertilization is an agricultural technique aimed at providing necessary and balanced nutrients for crop growth and development to enhance productivity. When appropriately designed, field application uses only necessary amounts and techniques that maintain the fertilizer in the root zone for as long as possible, enabling plant absorption. This results in both economic benefits, by reducing the producer's costs, and conservation of natural environments, as it avoids runoff and leaching into subsurface layers, thus protecting water resources. Given that the area under discussion belongs to conservation units, where the law mandates sustainable resource use, studies on the behavior of ion (solute) displacement from soil fertilizers become an invaluable tool for managers. Hence, this study aimed to evaluate the displacement of potassium, nitrate, and phosphate ions in the soil of the Pau-Rosa National Forest. The goal was sustainable cultivation of the Guarana crop, promoted in the region by ICMBio as an alternative income source for the population, as opposed to illegal activities in the area. To this end, effluent distribution curves, known as Breakthrough Curves (BTCs), were created to obtain transport parameters through inverse modeling. This process involved numerical adjustment of the advection-dispersion differential equation (ADE) that describes solute dynamics in the soil. Adjustment was performed using the CFITIM code of the STANMOD software (Studio of Analytical Models), which provides the Peclet number (P), retardation factor (R), and the regression coefficient ( $R^2$ ) between the observed and fitted data. With these parameters, we calculated the dispersion coefficient (D) and dispersivity ( $\lambda$ ), and subsequently created graphical representations of the BTCs. Given the emphasis on sustainable use of natural resources in protected areas like the Pau-Rosa Forest, we believe the most susceptible ion to leaching in the study soil is  $\text{NO}_3^-$ ,

followed by  $K^+$ , and lastly,  $PO_4^{3-}$ . Currently, residents in the region do not apply fertilizers to the guaraná plants, which are cultivated without specific cultural practices. Practically, the monopotassium phosphate fertilizer had a longer residence time in the soil, thereby enhancing availability to plants and reducing contamination risks from leaching.

**Keywords:** solute dynamics, miscible displacement, environmental conservation.

## 4.1. Introdução

### 4.1.1. Transporte de solutos no solo

A contaminação das águas superficiais, subsuperficiais e dos solos, proveniente da disposição inadequada de resíduos no ambiente pelo homem, tem-se tornado uma preocupação comum em todos os países, independente do grau de desenvolvimento. Mesmo que no Brasil, a ocorrência de solos permeáveis, aliados a fonte de contaminantes, sejam os principais responsáveis por prejuízos a aquíferos, ainda existe uma carência de estudos sobre a migração desses contaminantes no ambiente pedológico (PEREIRA et al., 2011).

O solo, dependendo da área do conhecimento e do objetivo da pesquisa apresenta as mais diversas definições. Considerando o estudo do deslocamento dos solutos no solo, Miranda (2001) apresenta a seguinte definição de solo:

*O termo solo refere-se à camada externa e agriculturável da superfície da terra, cuja origem é determinada pela ação de processos físicos, químicos e biológicos na rocha, dando origem a um material natural, sólido e poroso, que abriga em seus poros quantidades variáveis de solução. As diferentes ações desses processos resultam em tipos distintos de solos, os quais, apresentam uma disposição diferente com relação a esse espaço poroso e que por sua vez formam canais naturais, de onde se originam as interações entre a água e as partículas sólidas do solo, resultando em forças de atração e retenção da água no solo, diminuindo a energia em relação à água livre. (MIRANDA, 2001, p.4)*

O transporte de massa nos meios porosos é regido por diversos processos e não depende apenas do fluxo do fluido no qual esta massa está dissolvida (solução deslocadora). A massa, que pode ser qualquer substância dissolvida (solute), move-se com o fluido ou por um processo difusivo-dispersivo através dos meios porosos do solo, esteja ele em condição de saturação ou não (ARÉAS, 2006). O soluto em questão, pode agir como um contaminante, como substância de origem antrópica que são despejadas no ambiente sem técnicas de tratamento/remediação e acabam dissolvidas e/ou misturadas em águas superficiais, como por exemplo a poluição aplicação excessiva de determinados fertilizantes, descarte inadequado de esgotos e vazamento de aterros, bem como ter origem natural, como minas naturais de ferro, manganês e arsênio, contaminantes radioativos no leito rochoso e a intrusão de água salgada de áreas costeiras (SHU et al., 2023).

O estudo de migração desses contaminantes no perfil do solo, pode ser dividido em duas categorias principais. A primeira consiste nos problemas de fluxo multifásico e multicomponente relacionado ao estudo de fluidos imiscíveis no solo, como o líquido de fase não aquosa leve (LNAPL) e líquido de fase não aquosa densa (DNAPL), onde considera-se que os fluidos analisados podem estar em fase gasosa, líquida aquosa e líquida não aquosa e que em cada uma dessas fases pode conter diferentes compostos, tornando a análise bastante complexa (GARCIA, 2021; SHU et al., 2023). A segunda categoria, refere-se ao deslocamento miscível, do inglês *miscible displacement*, que ocorre quando um fluido se mistura com a solução do solo e desloca-se pelo perfil, onde ocorre a mobilização e adsorção dos íons no solo. Este processo pode ser influenciado por diferentes fatores, porém entende-se que a mobilidade dos solutos se relaciona inversamente com a capacidade de adsorção da matriz do solo em retê-los ou às condições dos meios que favoreçam a precipitação dos íons tornando imóveis (OLIVEIRA et al., 2013).

Shu et al. (2023) afirmam que a percolação é a força motriz para a migração de solutos em meios porosos, principalmente em meio saturado, onde o processo de migração do contaminante é o resultado da combinação da difusão molecular e a dispersão convectiva. Realizar este estudo em grandes áreas é inviável, devido à necessidade de conhecimento técnico, bem como estrutura laboratorial adequada. Dessa forma, foram desenvolvidas técnicas que possibilitassem o estudo em pequena escala, e posteriormente, os resultados pudessem ser extrapolados para explicar o processo em grandes áreas. A partir desse entendimento, iniciaram os experimentos utilizando colunas de solo em meio saturado ou insaturado, denominadas de curvas de distribuição de efluentes, do inglês *Breakthrough curves* (BTCs), visando descrever a tendência do deslocamento de solutos ao longo do perfil do solo. De forma geral, são construídas acondicionando o solo dentro de um material impermeável e rígido, mantidos ao ar livre ou em laboratório onde aplica-se uma solução deslocadora e então são controlados e/ou medidos parâmetros de infiltração, em seguida os efluentes são coletados e a concentração dos efluentes é analisada. As análises podem ser feitas considerando uma ou mais dimensões (SHU et al., 2023) e com o desenvolvimento das ferramentas computacionais ao longo dos anos, tem feito com que a aplicação conjunta com a modelagem tenha crescido em popularidade, principalmente pela sua capacidade preditiva (DHINGRA e SHAH, 2021).

#### 4.1.2. Modelagem matemática do transporte de contaminantes

A modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos do solo baseia-se em um modelo de percolação e, embora inúmeros processos bioquímicos também estejam envolvidos no processo, apenas alguns foram simulados até o presente momento, descritos a seguir, conforme apresentado minuciosamente na revisão bibliográfica realizada por SHU et al. (2023).

A advecção é o movimento relativo que ocorre quando um fluido flui para transportar a si mesmo e os solutos que ele contém para uma determinada posição espacial. Quando a taxa de fluxo do fluido aumenta em sistemas porosos, a velocidade do fluxo aumenta, aumentando a convecção e a diluição dos solutos. O fluxo convectivo ( $J_v$ ) é que descreve este processo (Equação 12).

$$J_v = \alpha u C \quad (12)$$

em que  $\alpha$  é a porosidade do meio poroso,  $u$  é a vazão média do fluido através do meio poroso e  $C$  é a concentração média do soluto.

A difusão, em termos ambientais, obedece à primeira lei de Fick quando o soluto tem comportamento estacionário, caso contrário, obedece a segunda lei de Fick. A intensidade da difusão é expressa pela razão entre o fluxo de difusão e o gradiente de concentração (Equação 13).

$$J_f = -D \frac{dC}{dx} \quad (13)$$

em que  $J_f$  é o fluxo de difusão ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ),  $D$  é o coeficiente de difusão ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $C$  é a concentração volumétrica da substância em difusão,  $\frac{dC}{dx}$  é o gradiente de concentração da substância.

A adsorção é o processo no qual íons e moléculas em solução são adsorvidos na superfície das partículas dos meios porosos e removidos da solução, a dessorção consiste no processo inverso. A essência da adsorção é a reciprocidade na troca entre as fases sólidas e líquidas. Este processo pode ser dividido em adsorção isotérmica de equilíbrio e adsorção isotérmica de não equilíbrio.

Na adsorção isotérmica de equilíbrio, os componentes da superfície sólida estão em equilíbrio contínuo com as mudanças de massa dos componentes do líquido. A quantidade de adsorção em um meio poroso é proporcional à concentração do soluto dissolvido na solução sob condições isotérmicas de adsorção linear (Equação 14).

$$F = K_d \cdot C \quad (14)$$

em que  $F$  é a concentração de sorção linear isotérmica, o  $K_d$  é o coeficiente de distribuição (Equação 29) e  $C$  é a concentração do contaminante dissolvido na solução.

Na adsorção isotérmica de não equilíbrio, a mudança de massa do componente de superfície sólida e a composição líquida não podem se aproximar do equilíbrio transitório, porém podem atingir progressivamente uma determinada taxa de adsorção. A equação mais simples utilizada para descrever essa condição, foi proposta por Langmuir (1967) (Equação 15).

$$\frac{\partial F}{\partial x} = K_3 C \quad (15)$$

em  $K_3$  é uma constante.

Podem ocorrer situações ainda em que o soluto, ao entrar no meio poroso, pode vir a sofrer alterações em sua composição proveniente das diferentes condições do ambiente em que está inserido. Dessa forma, mais uma variável é considerada, denominada de sumidouro, principalmente nos casos de decaimento radioativo, reações químicas com multicomponentes, reações redox e degradação microbiana.

Quando substâncias radioativas ou outros produtos químicos são capazes de atenuar a radiação presente no meio, a variável sumidouro pode ser descrita como na Equação 16.

$$\left(\frac{d(nC)}{dt}\right) = -\alpha k_f C \quad (16)$$

em que  $k_f$  é a taxa de decaimento para os núcleos em decomposição do fluido.

Quando ocorre uma reação química no componente A do meio fluido e ocorre um aumento no incremento de soluto, a equação do sumidouro é como descrita na Equação 17.

$$\left(\frac{d(C)}{dt}\right)_r = \sum_{j=1}^m R_{aj} \quad (17)$$

em que  $R_{aj}$  é a taxa de produção de massa da reação do componente A por unidade de volume do meio poroso e a função da concentração do componente A.

Em caso de ocorrer uma reação redox em um dos componentes do meio fluido no meio poroso, a equação do sumidouro fica:

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_r = -k_{red}[N^+][R] \quad (18)$$

em que  $k_{red}$  é coeficiente da taxa de oxidação/redução por unidade de volume.

Quando acontece uma reação bioquímica em um componente B do meio fluido da água subterrânea uma mudança no soluto ocorre, aplica-se o modelo bioquímico Monod no termo sumidouro (Equação 19).

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_{bio} = -\frac{k_{max} X_a S_f}{k_s + S_f} \quad (19)$$

em que  $\left(\frac{dC}{dt}\right)_{bio}$  é a taxa do consumo metabólico utilizado por unidade de volume de células,  $k_{máx}$  é a taxa máxima de utilização metabólica,  $X_a$  é a concentração de células vivas,  $Sf$  é a concentração da taxa metabólica limitante no contato celular, e  $ks$  é a metade da taxa máxima provável de utilização metabólica.

Considerando o processo de migração de contaminantes em um meio poroso, considerando particularidades específicas, é possível construir a equação diferencial do transporte advectivo-dispersivo-reativo (ADE) (Equação 20) sem considerar que a variação de massa da fase sólida dentro dos meios porosos.

$$\frac{\partial(\alpha C)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}[(1 - \alpha)\rho_s F] = \nabla(\alpha D \cdot \nabla C - \alpha u C) + \left(\frac{d(1 - \alpha)C}{dt}\right)_s + RC_R - PC + \left(\frac{d(\alpha C)}{dt}\right)_r \quad (20)$$

em que  $\alpha$  é a porosidade do meio poroso, o R e P no termo relacionado ao sumidouro representa a taxa na qual os poluentes são injetados e removidos da solução por unidade de tempo e por unidade do volume do meio poroso, respectivamente.  $C_R$  é a concentração de poluentes injetados,  $\left(\frac{d(\alpha C)}{dt}\right)_r$  é a taxa de reações químicas ou biológicas na fase líquida.

Atualmente existem inúmeros softwares disponíveis para estudar a migração de contaminantes em meios porosos, desde os mais complexos como os que utilizam Sistemas de Informação Geográfica (SIG) até os mais praticos como o STANMOD, utilizado neste estudo e será descrito na próxima sessão.

#### 4.1.3. Código CFITM e software STudio of ANalytical MODEls – STANMOD

O STANMOD (STudio of ANalytical MODEls) é um software compatível com ambiente Windows que combina vários modelos analíticos, desenvolvido para otimizar a resolução de problemas de transporte de solutos em diferentes graus de complexidade e dimensionalidade. Resultado de uma parceria da U.S. Salinity Laboratory e da University of California, ambos situado em Riverside, Califórnia, o software é disponibilizado de forma gratuita pelo site [www.pc-progress.com/en/Default.aspx?stanmod](http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?stanmod) (Van Genuchten et al., 2012).

O STANMOD, possui vários modelos matemáticos integrados. Em resumo, o modelo CFITM é utilizado para predição ou análise de dados observados das BTCs em termos da equação de advecção-dispersão (ADE) de equilíbrio, considerando uma dimensão. O código CFITM é destinado a problemas semelhantes, porém incluído a possibilidade de analisar o transporte onde não exista um equilíbrio físico ou químico.

O CXTFIT permite predições e análises de transporte de equilíbrio e não equilíbrio no tempo e/ou espaço. O código CHAIN foi criado para prever o transporte de solutos sujeitos a reações em cadeia de decomposição de primeira ordem consecutivas.

O código SCREEN é utilizado para avaliações ambientais (transporte, degradação, adsorção e volatilização) de produtos orgânicos aplicados no solo. E os códigos 3DADE e N3DADE para análise de problemas de transporte multidimensional assumindo condições de equilíbrio e não equilíbrio respectivamente (Van Genuchten et al., 2012).

Van Genuchten et al. (2012) descreve que todos os modelos dentro do STANMOD são capazes de resolver problemas diretos, que são aqueles em que as concentrações de soluto podem ser previstas, a partir da entrada de um conjunto de de parâmetros de transporte como o coeficiente de dispersão, velocidade de água nos poros, coeficiente de dispersão, e quando aplicável, os coeficientes de produção de ordem zero e de degradação de primeira ordem. Adicionalmente, alguns desses códigos (CFITM, CFITM, CXTFIT e 3DADE) são capazes de resolver problemas de



forma inversa, ou seja, os parâmetros de transporte podem ser estimados a partir experimentos em que há observação da distribuição das concentrações em função do tempo e/ou distância, como por exemplo as BTCs.

Nesse último caso, o software realiza a estimativa dos parâmetros usando uma abordagem de otimização de mínimos quadrados não linear poderada do tipo Marquardt-Levenberg que minimiza a função objetivo (O) (equação 21).

$$O(b) = \sum_{i=1}^n w_i [c_i^*(x, t) - c_i(x, t; b)]^2 \quad (21)$$

em que  $n$  é o número de pontos coletados de concentração,  $c_i^*(x, t)$  são as concentrações observadas no tempo  $t$  e na localização  $x$  (em uma, duas ou três dimensões),  $c_i(x, t; b)$  representam as concentrações correspondentes previstas pelo modelo para um vetor  $b$  de parâmetros de transportes desconhecidos e  $w_i$  são pesos associados a um determinado ponto dos dados de concentração.

Nesta pesquisa, foram estimados os parâmetros de transporte dos íons nitrato, fosfato e potássio, utilizando as BTCs e ajustando conforme o código CFITIM (van Genuchten, 1981) que resolve analiticamente a equação de advecção-dispersão-reativa, considerando situação de equilíbrio ou desequilíbrio químico e físico, em apenas uma dimensão e em regime de fluxo constante, gerando uma versão simplificada da ADE (LAPIDUS e AMUNDSON, 1952) (equação 22).

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (22)$$

em que  $c$  é a concentração do soluto ( $M L^{-3}$ ),  $x$  é a distância (L),  $t$  corresponde ao tempo (T),  $D$  é o coeficiente de dispersão ( $L^2 T^{-1}$ ),  $v$  é a velocidade média da água nos poros ( $L T^{-1}$ ) e  $R$  é fator de retardamento (adimensional).

O fator de retardamento, dado pela equação 23, representa a capacidade de retenção do solo para um elemento ou composto presente em uma solução. Quanto maior o fator de retardamento, maior é a interação entre o solo e o soluto, retendo mais fortemente os íons em sua matriz sólida, retardando seu transporte em relação à água (Van Genuchten et al., 1974).

$$R = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta} \quad (23)$$

em que  $R$  é o fator de retardamento (adimensional),  $\rho$  é a densidade do solo ( $M L^{-3}$ ), o  $K_d$  corresponde ao coeficiente de distribuição do soluto entre as fases líquida e sólida (adimensional) e  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água ( $L^3 L^{-3}$ ). A equação assume que existe um equilíbrio na adsorção, ou seja, que a adsorção ou reações de troca são sempre instantâneas.

Visando uma melhor análise dos dados de efluente van Genuchten et al. (1980) afirmam ser mais conveniente o uso de variáveis adimensionais, facilitando o uso assim de diferentes formas de solução analítica da ADE. Dessa forma, são introduzidos o número do volume de poros (T) (Equação 24) e o número de Peclet (P) (equação 25).

$$T = \frac{vL}{L} \quad (24)$$

$$P = \frac{vL}{D} \quad (25)$$

em que  $T$  é volume de poros,  $P$  é o número de Peclet da coluna e  $L$  é o comprimento da coluna.

Reescrevendo a equação da ADE (equação 22), considerando o número de Peclet, tem-se que (Equação 26):

$$R \frac{\partial c}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (26)$$

e  $c$  é a concentração normalizada.

Quando a solução deslocadora é aplicada em fluxo constante, apenas dois parâmetros precisam ser determinados pelo STANMOD ( $P$  e  $R$ ). De posse desses parâmetros pode-se calcular o coeficiente de dispersão ( $D$ ), (Equação 27), a dispersividade ( $\lambda$ ) (equação 28) e o coeficiente de distribuição ( $K_d$ ) (equação 29).

$$D = \frac{v \cdot L}{P} \quad (27)$$

$$\lambda = \frac{D}{v} \quad (28)$$

$$K_d = \frac{(R - 1)\theta}{\rho} \quad (29)$$

em que  $D$  é o coeficiente de dispersão ( $\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$ ),  $\lambda$  é a dispersividade (cm),  $K_d$  é o coeficiente de distribuição ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ ) e  $\rho$  é a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ )

Van Genuchten et al. (2012) afirma ainda, que de posse dos parâmetros de transporte, a previsão da concentração média do fluxo, deixando a coluna, pode-se utilizar a solução analítica de conservação de massa de Lapidus e Amundson (1952) (Equação 30)

$$c(X, T) \equiv A(X, T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\sqrt{P}(RX - T)}{2\sqrt{RT}} \right] + \frac{1}{2} e^{PX} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\sqrt{P}(RX - T)}{2\sqrt{RT}} \right] \quad (30)$$

em que  $\operatorname{erfc}$  é a função de erro complementar.

O objetivo desse estudo foi avaliar os parâmetros de transporte dos íons nitrato, fosfato e potássio em um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, visando o cultivo sustentável da cultura do Guaraná, que vem sendo estimulada na região pelo ICMBio, como alternativa de renda a atividades ilegais realizadas na região. Para tal, foram elaboradas Breakthrough Curves (BTC's) (Curvas de Distribuição de Efluentes) para a obtenção dos parâmetros de transporte, mediante o ajuste numérico da equação diferencial de advecção-dispersão (ADE) que descreve a dinâmica dos solutos no solo.

## 4.2. Material e Métodos

### 4.2.1. Localização da área, amostragem do solo e preparo do solo.

As amostras do material de solo foram coletadas na comunidade Lírio do Vale, ao lado da cachoeira do Salto do Amana, limite sudeste da Flona do Pau-Rosa com estado do Pará. Foram escolhidos três pontos de coleta, não muito distantes entre si, visando garantir que pertencessem à mesma mancha de solo (Tabela 6).

Com o auxílio de uma “boca de lobo”, foi realizada a abertura do solo com aproximadamente 0,3 m de profundidade, 0,5 m de largura e 0,5 m de comprimento, todo o solo extraído foi coletado, homogeneizado e acondicionado em sacos plásticos com o auxílio de uma pá.

Em seguida foram transportadas para o Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, onde foram destorroadas e passadas pelo processo de tamisação em uma peneira de malha de 2,0 mm de abertura e em seguida, secas ao ar livre, para a obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar). Após o processo de secagem, 500g de amostra foi encaminhada ao Laboratório de Solos da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Amazonas para a caracterização físico-química.

As demais foram transportadas por via aérea para o laboratório de Física do Solo, do Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” para a elaboração das BTCs. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017).

**Tabela 6.** Coordenadas geográficas das amostras de solo coletadas.

Ponto de coleta	Coordenadas Geográficas	
	Latitude	Longitude
Amostra 1 (A1)	4°23'51.73"S	57°28'16.51"O
Amostra 2 (A2)	4°44'9.23"S	57°29'17.04"O
Amostra 3 (A3)	4°44'9.70"S	57°29'17.23"O

#### 4.2.2. Análise físicas e químicas do solo.

A análise química do solo pode ser conferida pela Tabela 7, constando as seguintes informações: acidez ativa (pH); acidez potencial (H+Al); alumínio (Al); cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T); capacidade de troca de cátions efetiva (t); potássio (K); fósforo (P); enxofre (S); boro (B); sódio (Na); matéria orgânica (MO); tampão SMP (pHSMP); condutividade elétrica (CE) e fósforo remanescente (Prem). As classes de interpretação e metodologias de pH, S e B seguem Raij et al. (1997). As demais classes de interpretação, exceto CE, seguem Ribeiro et al. (1999).

**Tabela 7.** Características químicas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, na camada de 0 a 30 cm de profundidade.

Prof (cm)	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Al	Ca	Mg	SB	T	t	K
		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>							mg dm <sup>-3</sup>
0-30	● 3,90	● 6,43	● 1,30	● 0,20	● 0,20	● 0,46	6,89	● 1,76	● 16,00
Prof (cm)	P	S	B	Na	MO	pHSMP	CE	Prem	
		mg dm <sup>-3</sup>			dag kg <sup>-1</sup>	-	dS m <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-3</sup>	
0-30	● 5,00	● 19,00	● 0,24	4,00	● 1,46	5,60	0,061	23	
Classes de interpretação		● Muito Alto	● Alto	● Médio	● Baixo	● Muito baixo			

Pela Tabela 8, podem ser conferidas as seguintes características físicas do solo: densidade do solo ( $\rho$ ); densidade de partículas ( $\rho_s$ ); condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ); umidade atual (U); porosidade; teores de areia, silte e argila, e por fim; a classe textural baseada no Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2018).

**Tabela 8.** Características físicas de um solo da Floresta Nacional do Pau-Rosa, na camada de 0 a 30 cm de profundidade

$\rho$	$\rho_s$	U	Porosidade	Areia	Silte	Argila	Textura
g/cm <sup>3</sup>				%			-
1,44	2,17	8,26	33,64	72,4	10,8	16,8	Média-arenosa

#### 4.2.3. Soluções deslocadoras

Foi avaliado o deslocamento os íons nitrato, fosfato e potássio, utilizando soluções deslocadoras descritas na Tabela 9. As concentrações tiveram como base a recomendação de adubação feita pela Embrapa Amazônia Ocidental para a cultura do guaraná da Amazônia, considerando plantas já estabelecidas na fase adulta e produtivas, em covas de 40 x 40 cm e camada arável de 20 cm de profundidade (EMBRAPA, 2005). Os fertilizantes escolhidos possuíam o íon potássio em comum, permitindo o estudo da influência do íon acompanhante no seu deslocamento. Optou-se por não realizar a correção do pH do solo, visando reproduzir as condições naturalmente encontradas pelos modadores na Flona do Pau-Rosa.

**Tabela 9.** Descrição das soluções deslocadoras.

Íon	Solução deslocadora		Concentração (mg L <sup>-1</sup> )
	Nomenclatura	Fórmula química	
Nitrato – NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrato de potássio	KNO <sub>3</sub>	1875,00
Fosfato – PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Fosfato monopotássico	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2471,59
Potássio – K <sup>+</sup>	Cloreto de potássio	KCl	3198,53

#### 4.2.4. Caracterização do permeâmetro de carga constante

Para este estudo, foi utilizado um aparato típico em testes de movimentos de solutos no solo (Figura 14). A célula de percolação, denominada de permeâmetro de parede rígida, foi confeccionada em acrílico, com as dimensões médias de 0,05 m de diâmetro, por 0,15 m de altura, totalizando aproximadamente 0,000295 m<sup>3</sup> de volume.

Composta por uma coluna, com hastes metálicas rosqueadas, arruelas e porcas-borboleta para fixação da coluna às bases acrílicas. Ambas as bases continham um anel o-ring de vedação, telas metálicas com uma camada de papel filtro para garantir que o solo fosse completamente retido durante o processo de percolação, evitando o entupimento da tela metálica. O aparato possuía três orifícios na base superior, para entrada de soluções e um orifício na base inferior para saída.

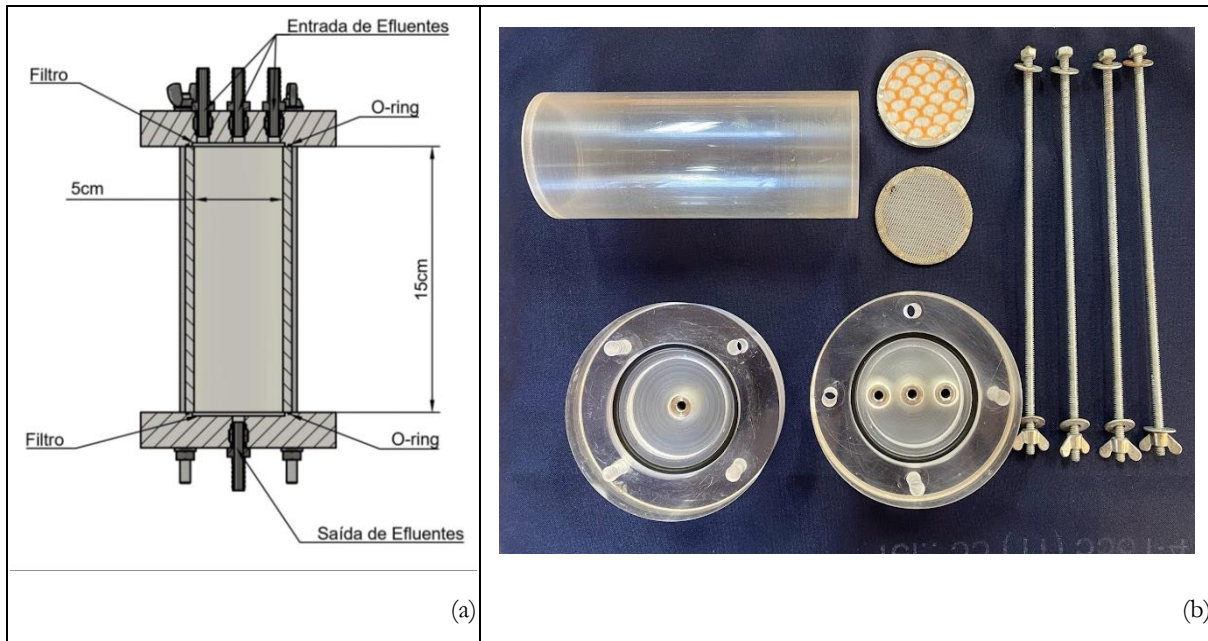


Figura 14. Permeâmetro de parede rígida: (a) representação esquemática, e; (b) partes componentes.

#### 4.2.5. Montagem das colunas de solo para elaboração das *Breakthrough Curves* (BTC's)

Uma coluna auxiliar foi acoplada com fita adesiva para auxiliar no preenchimento da coluna principal, já encaixada na base inferior. Visando garantir uma densidade de solo aproximada daquela encontrada ao campo, foi feito um cálculo da massa de solo necessária, considerando o volume proporcional da coluna.

Diante dessa estimativa de massa da TFSA, ela foi adicionada mediante um funil metálico com uma haste longa acoplada, em movimentos circulares, lentos e constantes, evitando a formação de camadas estratificadas ou rotas preferenciais de escoamento. Em seguida, com o auxílio de um martelo de borracha, foram dadas “leves batidas”, com o objetivo de acondicionar ao máximo o material de solo estimado para aquela determinada densidade. Então a coluna auxiliar foi retirada, a base superior foi acomplada e a coluna fechada com as hastes metálicas rosqueando as borboletas.

Nesse momento a coluna foi novamente pesada e a densidade de solo, a porosidade e o volume de poros foram calculados conforme as equações 31, 32 e 33 respectivamente (Tabela 10). A densidade de partículas, obtida pelo método do balão volumétrico, foi de  $2,17 \text{ g cm}^{-3}$ .

$$D_s = \frac{m}{v} = \frac{m_{c+s} - m_c}{v} \quad (31)$$

$$\alpha = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (32)$$

$$Vp = \pi r^2 h \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (33)$$

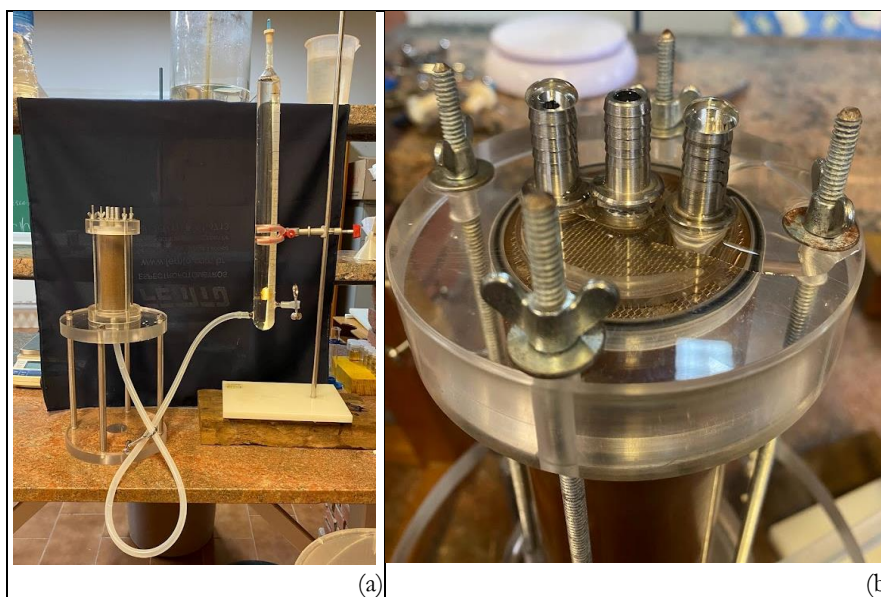
em que  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $m$  é a massa de solo na coluna (kg),  $v$  é o volume de solo na coluna ( $\text{m}^3$ ),  $m_{c+s}$  é massa total (coluna +solo) (kg),  $m_c$  é a massa da coluna vazia (kg),  $\alpha$  é a porosidade do solo ( $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ ),  $D_p$  é a densidade de partículas( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $Vp$  é o volume de poros ( $\text{m}^3$ ),  $r$  é o raio da coluna (m) e  $h$  é a altura da coluna (m).

**Tabela 10.** Densidade do solo ( $D_s$ ), Porosidade ( $\alpha$ ) e Volume de Poros (VP) das colunas de solo utilizadas nas BTCs.

Solução deslocadora	Repetição	Densidade	Porosidade	Volume de Poros
		$\text{g cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$\text{cm}^3$
Cloreto de Potássio (KCl)	I	1,32	0,39	114,12
	II	1,37	0,37	106,27
	III	1,36	0,37	108,63
Nitrato de Potássio (KNO <sub>3</sub> )	I	1,31	0,39	113,66
	II	1,33	0,39	112,05
	III	1,37	0,37	107,78
Fosfato monopotássico (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	I	1,41	0,35	102,53
	II	1,31	0,40	116,63
	III	1,29	0,41	117,20

#### 4.2.6. Saturação das colunas de solo por capilaridade

Para realizar a saturação das colunas de solo, uma mangueira de látex foi interligada entre uma bureta de Mariotte contendo água deionizada e o orifício inferior da base acrílica. Os orifícios superiores foram mantidos abertos para a expulsão do ar, contido nos poros do solo. Nesse processo é importante que a abertura de entrada da pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ) da bureta de Mariotte esteja com o nível levemente acima da base da coluna e que o encaixe da mangueira seja realizado de forma rápida e cuidadosa eliminando assim a formação de qualquer bolsa de ar que poderia prejudicar a passagem da solução deslocadora. Então aplicou-se uma diferença de potencial gravitacional aos poucos, elevando a bureta lentamente em relação à parte superior da coluna acrílica. Dessa forma, a subida da água pela coluna era realizada de maneira lenta e ascendente por capilaridade. Ao observar o menisco da água nos orifícios superiores, o processo era paralisado e o conjunto deixado em repouso por 24h, para eventual liberação das bolhas de ar residuais (Figura 15).



**Figura 15.** Processo de saturação das colunas por capilaridade: (a) visão geral do conjunto e (b) momento em que o menisco de água destilada atinge os orifícios superiores da coluna e o conjunto é mantido em repouso.

#### 4.2.7. Lavagem da coluna de solo

Passado o tempo de repouso para saturação, iniciou-se o processo de “lavagem do solo”, invertendo o sentido do fluxo da água, conectando um frasco de Mariotte contendo água destilada com uma mangueira em um dos orifícios da base superior da coluna acrílica e os demais orifícios foram vedados (Figura 16). Esse processo visa a remoção da maioria dos íons presentes no complexo de troca que são facilmente solúveis, para que sejam dissolvidos e removidos por percolação. A carga hidráulica foi mantida em 8 hPa. O final do procedimento ocorreu quando a condutividade elétrica (CE) da água deionizada aplicada na parte superior da coluna se igualava à solução de saída.



**Figura 16.** Coluna de acrílico utilizada como permeâmetro de carga constante: (a) partes componentes da coluna; (b) processo de saturação da coluna por capilaridade, e; (c) obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ).

Este esquema experimental da Figura 16 fez com que as colunas se comportassem como permeâmetros de carga constante, possibilitando a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ). Quando o fluxo de água atingiu a constância, determinou-se a vazão (volume/tempo) através da média de três coletas. Em seguida, conhecendo as dimensões da coluna, determinou-se a área pela qual o fluxo estava atravessando e aplicou-se a equação 34, para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado (KLUTE, 1965).

$$K_{sat} = \frac{Q \cdot L}{Área \cdot (L + h)} \quad (34)$$

em que  $Q$  é a vazão,  $L$  é o comprimento da coluna de solo e  $h$  é a carga hidráulica sobre a coluna.

O fluxo ( $q$ ) de cada coluna foi calculado por meio da relação:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{V_e}{A_t} \quad (35)$$

em que  $q$  é a densidade de fluxo ( $\text{cm min}^{-1}$ ),  $Q$  é a vazão ( $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$ ),  $A$  é a seção transversal da coluna ( $\text{cm}^2$ ),  $V_e$  é o volume total de efluente ( $\text{cm}^3$ ),  $t$  é o intervalo de tempo para coletar o volume (h).

A velocidade de avanço da solução percolante é obtida através da seguinte equação:

$$V_f = \frac{q}{\alpha} \quad (36)$$

em que  $V_f$  é a velocidade de avanço ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $q$  é a densidade de fluxo ( $\text{cm min}^{-1}$ ).

#### 4.2.8. Passagem da solução deslocadora, coleta e análise dos efluentes

Após a lavagem do solo, a passagem de água foi cessada e imediatamente iniciou-se a passagem da solução deslocadora contida em um frasco de Mariotte mantendo-se em regime de fluxo constante e carga hidráulica em 8hpa (Figura 17 (a) e (b)). Nesse momento, começou-se a coleta sequencial de alíquotas de 15 mL em frascos de acrílico (Figura 17(c)). O volume coletado foi aferido com o auxílio de uma balança.



**Figura 17.** Processo de passagem da solução deslocadora na coluna de solo: (a) visão geral do processo; (b) coleta dos efluentes, e (c) efluentes da solução deslocadora de fósforo, em intervalos de 5 coletas.

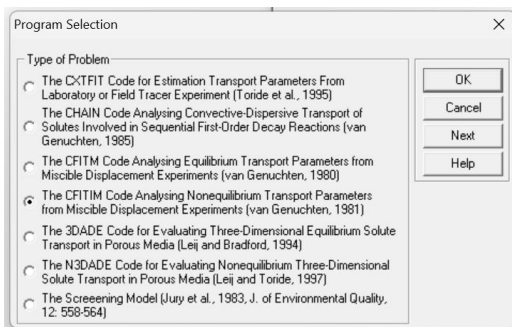
Ao elaborar uma BTC é preferencial que a concentração relativa ( $C/C_0$ ) atinja o seu máximo, ou seja, que a concentração da solução de entrada seja aproximadamente igual à de saída ( $C/C_0 = 1,0$ ). Porém, com excessão da leitura de potássio, as demais análises químicas não foram lidas diretamente no momento da coleta. Dessa forma, na primeira repetição de todas as amostras, foram coletados 100 frascos e determinadas as concentrações. Pôde-se perceber que a concentração relativa máxima de todos as soluções deslocadoras era atingida antes da 50ª coleta. Dessa forma, nas duas repetições seguintes, foram consideradas apenas os 50 primeiros frascos para a representação gráfica das BTC's. A determinação da concentração dos íons nas amostras de efluente coletadas ( $C$ ), assim como a concentração de íons da solução descoladora ( $C_0$ ) foi determinada. As concentrações dos íons potássio foi determinada por fotometria de chama e a concentração dos íons nitrato e fosfato por espectrofotometria-UV.

#### 4.2.9. Ajuste numérico das BTCs e obtenção dos parâmetros de transporte pelo código CFITIM (STANMOD)

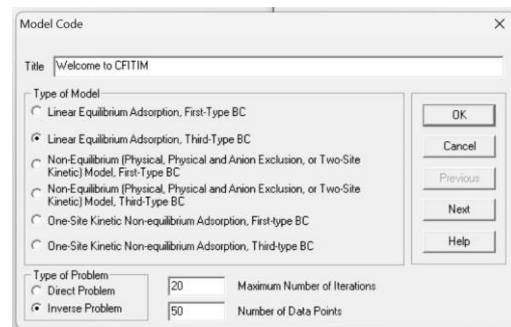


Para a obtenção dos parâmetros de transporte de solutos, foi realizado o ajuste numérico da equação diferencial de advecção-dispersão (ADE) (Equação 26) mediante o software STANMOD, utilizando-se o código CFITIM, obtendo-se o fator de retardamento (R) e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D).

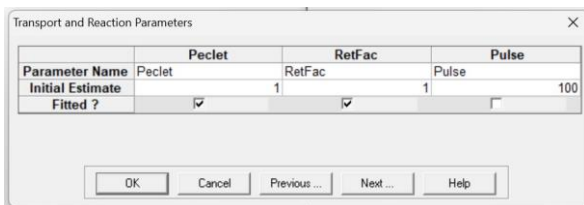
A sequência de etapas executadas dentro do STANMOD está detalhada nas capturas de tela (*Printscreen*) da Figura 18. Na primeira tela, é realizada a escolha do código CFITIM para obtenção os parâmetros de transporte (Van Genuchten, 1980). Na segunda tela selecionou-se a opção de adsorção de equilíbrio linear, terceiro tipo BC, modelagem inversa/modelagem inversa, já que a obtenção dos parâmetros será realizada a partir da concentração conhecida dos efluentes, com número máximo de iterações igual a 20 e o número de pontos coletados para cada BTC que após análises iniciais foi fixado em 50 pontos.



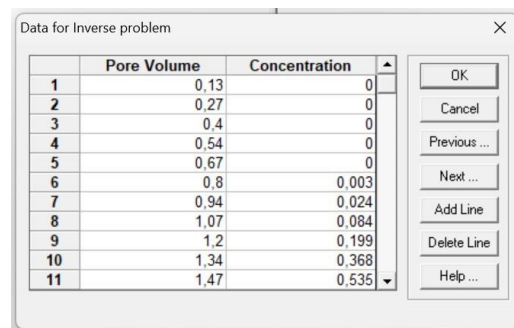
Tela 1



Tela 2



Tela 3



Tela 4

**Figura 18.** Etapas executadas no STANMOD para a obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo a partir das Breakthrough curves.

Na terceira tela foi necessário entrar com “chutes iniciais” dos parâmetros (initial estimate), quanto mais próximos aos reais, menor o número de iterações necessárias para que o modelo realize o ajuste. Em seguida, nesta mesma tela, marcou-se a opção de ajustar os parâmetros (fitted?) apenas para o P e R, uma vez que não se trabalhou com fluxo em pulso e sim fluxo constante. No entanto o modelo necessita que se atribua uma estimativa inicial para o pulso e por este motivo foi atribuído o valor 100. E por fim, na quarta tela, inseriu-se a concentração relativa ( $C/C_0$ ) de cada efluente coletado, de forma sequencial, juntamente com o volume de poros correspondente. As condições inicial e de contorno consistiram em:

$$\begin{aligned}
 t = 0, \quad z > 0, \quad C = 0 \\
 0 < t < t_f, \quad z = 0, \quad C = C_0 \\
 t > 0, \quad z = 0, \quad C = 0 \\
 t > 0, \quad z \rightarrow \infty, \quad C = 0
 \end{aligned}$$

em que,  $t$  é o tempo,  $t_f$  é o tempo final da passagem da solução e  $z$  é a coordenada vertical de posição.

O programa retornou um gráfico representando a BTC, juntamente com um arquivo de texto informando os valores de entrada de parâmetros (“chutes iniciais), os dados observados, o número de iterações necessárias para ajustar os parâmetros, a matriz de correlação, o valor dos parâmetros ajustados e por fim, os dados ajustados correspondentes aos dados observados de entrada. Dessa forma, foi realizada a análise dos parâmetros de transporte obtidos, juntamente com o gráfico, observando em termos de inclinação das BTCs (“slope”).

#### 4.2.10. Análise estatística

De posse do conjunto de  $n$  dados observados ( $O_i$ ) e do conjunto correspondente de dados predidos ( $P_i$ ), foi realizada uma comparação de semelhança entre os dois através de índices estatísticos, uma vez que o ajuste visa torná-los o mais símile possível. Neste estudo, foi utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 37).

O  $R^2$  representa a fração da variância total nos dados observados explicada pelo modelo. O resultado da análise é um valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior a concordância entre a observação e o modelo (LEGATES; MCCABE JR, 1999).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right\}^2 \quad (37)$$

### 4.3. Resultados e Discussão

Durante a elaboração das BTCs, realizou-se a caracterização hidráulica do movimento dos solutos nas colunas de solo (Tabela 11) e a coleta de efluentes, base de parte dos cálculos dos parâmetros de transporte dos solutos avaliados no solo da Flona do Pau-Rosa.

**Tabela 11.** Caracterização hidráulica do movimento das colunas no solo: vazão (Q), a condutividade hidráulica em solo saturado (Ksat), a densidade de fluxo (q), a velocidade média da água nos poros (vm) e o tempo médio de coleta dos efluentes de 15 ml ( $\Delta t$ ).

Solução deslocadora	Repetição	Q	Ksat	q	vm	$\Delta t$
			cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	cm min <sup>-1</sup>	min
Cloreto de Potássio (KCl)	I	5,93	0,20	0,30	0,78	2,53
	II	8,82	0,30	0,46	1,24	1,70
	III	8,02	0,27	0,41	1,11	1,87
Nitrato de Potássio (KNO <sub>3</sub> )	I	8,82	0,30	0,46	1,16	1,70
	II	17,24	0,58	0,90	2,31	0,87
	III	10,34	0,35	0,53	1,44	1,45
Fosfato monopotássico (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	I	13,89	0,46	0,71	2,04	1,08
	II	18,07	0,60	0,92	2,33	0,83
	III	10,20	0,35	0,53	1,30	1,47

Já na Tabela 12, pode-se observar primeiramente os parâmetros de transporte, obtidos por modelagem inversa e ajuste numérico das BTCs pelo código CFITIM do STANMOD, fator de retardamento (R) e o número de Peclet (P) em seguida, os valores calculados do coeficiente de dispersão (D) e da dispersividade ( $\lambda$ ). Mais adiante pode-

se conferir o volume de poros necessários para que a a concentração relativa se iguale à aproximadamente 0,5, uma vez que Nielsen e Biggar (1962), afirmam que se ao observar este ponto na BTC e o valor do VP for superior a 1, indica que houve interação entre o íon de interesse e a matriz do solo estudado. Considerando, este último parâmetro, verificou-se que em todas as colunas, essa condição foi atendida, confirmando que de fato ocorreu essa interação. Por fim, foram apresentados os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que variaram entre 0,937 e 0,996, indicando que todos os ajustes realizados pelo modelo foram confiáveis e satisfatórios.

**Tabela 12.** Fator de Retardamento (R), número de Pelet (P), coeficiente de dispersão (D), dispersividade ( $\lambda$ ), Volume de poros (VP) quando  $C/C_0$  é igual a 0,5 e análise de regressão do ajuste ( $R^2$ ) para cada triplicata.

Solução deslocadora	Íon	Rep.	R	P	D	$\lambda$	VP	$R^2$
			Adimensional	Adimensional	cm <sup>2</sup> min <sup>-1</sup>	cm	( $C/C_0=0,5$ )	
Cloreto de Potássio (KCl)	K <sup>+</sup>	I	1,78	23,48	0,50	0,64	1,84	0,991
		II	1,81	35,85	0,52	0,42	1,83	0,995
		III	1,64	48,04	0,35	0,31	1,66	0,994
Nitrato de Potássio (KNO <sub>3</sub> )	K <sup>+</sup>	I	1,72	60,57	0,29	0,25	1,72	0,996
		II	2,06	27,32	1,26	0,55	2,09	0,988
		III	1,72	11,31	1,33	1,33	2,01	0,978
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	I	1,41	86,01	0,20	0,17	1,45	0,980
		II	1,44	41,27	0,84	0,36	1,67	0,952
		III	2,22	10,60	2,05	1,42	1,47	0,937
Fosfato Monopotássico (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	K <sup>+</sup>	I	3,23	17,58	1,74	0,85	2,93	0,976
		II	2,94	22,66	1,55	0,66	2,83	0,979
		III	2,59	34,73	0,56	0,43	2,56	0,977
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	I	3,44	31,17	0,95	0,47	3,36	0,980
		II	2,93	29,93	1,17	0,50	2,83	0,982
		III	2,22	10,60	1,84	1,41	2,56	0,982

Menor valor
  Maior valor

Pela Figura 19 pode-se conferir a representação gráfica das BTCs, em triplicada, utilizando as seguintes soluções deslocadoras: cloreto de potássio (Figura 19 (A)), onde avaliou-se apenas o íon K<sup>+</sup>; nitrato de potássio (Figura 19 (B)), onde avaliou-se os íons K<sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; fosfato de potássio (Figura 19(C)), onde avaliou-se os íons K<sup>+</sup> e os PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. No gráfico de uma BTC, o eixo das ordenadas representa os valores de concentração relativa ( $C/C_0$ ), o que corresponde à razão da concentração do íon, naquele ponto coletado, pela concentração inicial do íon analisado na solução deslocadora e o eixo das abscissas representa os valores de volume de poros (VP) necessários para atingir a concentração relativa correspondente. Como o VP é variável adimensional criada relacionada ao tempo, quanto maior o VP para que a concentração do íon no efluente coletado se iguale a concentração do íon na solução deslocadora ( $C/C_0$ ) maior a interação desse íon com a matriz do solo. Ao analisar uma BTC, quanto maior o deslocamento da curva para a direita, maior será a interação do solo com o soluto, retendo-o de forma a deixar a sua lixiviação mais lenta.

Observando-se os gráficos das BTCs (Figura 19), pode-se afirmar que o tempo de lavagem do solo foi adequado para lixiviar a maior parte dos íons adsorvidos, uma vez que a concentração relativa de todas as curvas iniciou no ponto zero do respectivo eixo. Considerando a análise físico-química do solo (Tabela 2), era esperado que não seriam necessários longos períodos de lavagem, por se tratar de um solo fortemente ácido (pH = 3,90), característico

de regiões tropicais, ademais as concentrações dos íons analisados foram classificadas como baixas (potássio) e muito baixas (fósforo) considerando a classificação de Ribeiro et al. (1999). Como o pH indica a quantidade de íons hidrogênio ( $H^+$ ) existentes no solo, um solo muito ácido possui muitos íons  $H^+$  e conseqüentemente poucos íons essenciais como cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e potássio ( $K^+$ ) adsorvidos em seu complexo coloidal, assim como elevados teores de alumínio tóxico, excesso de manganês, alta fixação de fósforo nos colóides e deficiência em alguns micronutrientes (ROQUIM, 2010).

Em relação ao cloreto ( $Cl^-$ ), este ânion pode ser utilizado como uma prova em branco em estudos de deslocamento miscível, uma vez que apesar de ser considerado um íon móvel, não apresenta interação com a matriz do solo e nem sofre transformações durante sua movimentação no perfil (NIELSEN e BIGGAR, 1962; REBOUÇAS, 2021; BATISTA, 2022). Neste estudo, optou-se por não quantificar a concentração do íon, mas sim utilizá-lo como uma prova em branco ao comparar a influência do íon acompanhante ( $NO_3^-$  e  $PO_4^{3-}$ ) no deslocamento do  $K^+$ .

Pôde-se observar que o  $K^+$  necessitou de no mínimo 3 volume de poros (VP) para atingir a máxima concentração relativa quando aplicado em forma de cloreto de potássio. Os íons  $K^+$  e  $NO_3^-$  necessitaram de no mínimo 2,8 e 2,1 VP para atingir a concentração máxima relativa quando aplicados em forma de nitrato de potássio. Em relação aos íons  $K^+$  e  $PO_4^{3-}$ , o número de pontos coletados não permitiu atingir a concentração máxima, porém observa-se que a curva de ambos os íons se apresentou fortemente deslocada para a direita, permitindo inferir que houve elevada adsorção pela matriz do solo.

Sobre os solos sob condições tropicais, Ronquim (2010) afirma que os principais componentes da fração mineral dos solos são as argilas coloidais, as substâncias húmicas e os sesquióxidos de ferro e alumínio, que possuem a superfície eletricamente carregadas atraindo diversos íons e moléculas polarizadas, as quais se ligam forma reversível. Esses colóides geralmente apresentam maior número de cargas negativas em relação às positivas, dessa forma a preferência pela adsorção é pelos cátions. Ademais, por possuírem uma boa porosidade e alta permeabilidade, acabam apresentando grandes perdas de nutrientes por lixiviação, principalmente sob forma aniônica. Raij (1998) citado por Rossi et al. (2007) indicam a ordem de afinidade de ânions com a superfície de óxidos de ferro e alumínio hidratados: fosfato > molibdato > fluoreto > sulfato > cloreto > nitrato.

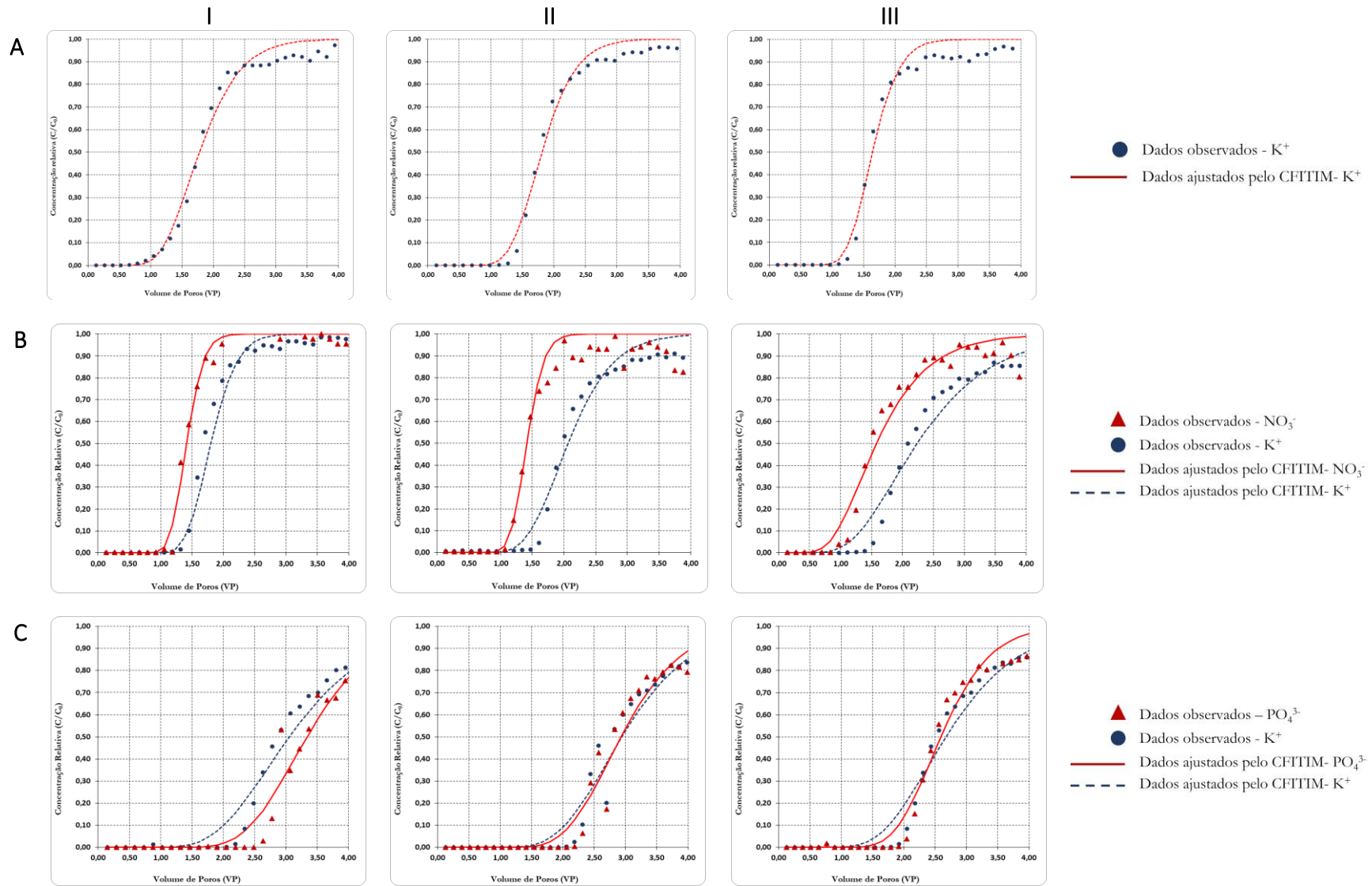


Figura 19. Breakthrough curves em triplicata (I, II, III), utilizando diferentes soluções deslocadoras: cloreto de potássio (A), nitrato de potássio (B) e fosfato monopotássico (C).

O fator de Retardamento (R) representa a diferença entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante, funcionando como um parâmetro que expressa a capacidade do solo em reter íons (VALOCCHI, 1984). Em outras palavras, representando a capacidade de retenção do solo para um determinado elemento ou composto.

Essa afinidade dos solos tropicais pela adsorção preferencial pelos cátions, foi refletida em maiores valores no R (Tabela 12) e no deslocamento da curva do à direita do eixo (Figura 19) em relação ao  $\text{NO}_3^-$ . Observa-se também a pouca afinidade do  $\text{NO}_3^-$  na matriz do solo como indicado pela ordem de afinidade de Raij (1998). Pavodese (1988) afirma é que o nitrato adicionado ao solo tende a ficar quase que totalmente dissolvido na solução, onde aproximadamente 60% são absorvidos pelas plantas e os 40% restantes sujeitos a lixiviação e/ou desnitrificação.

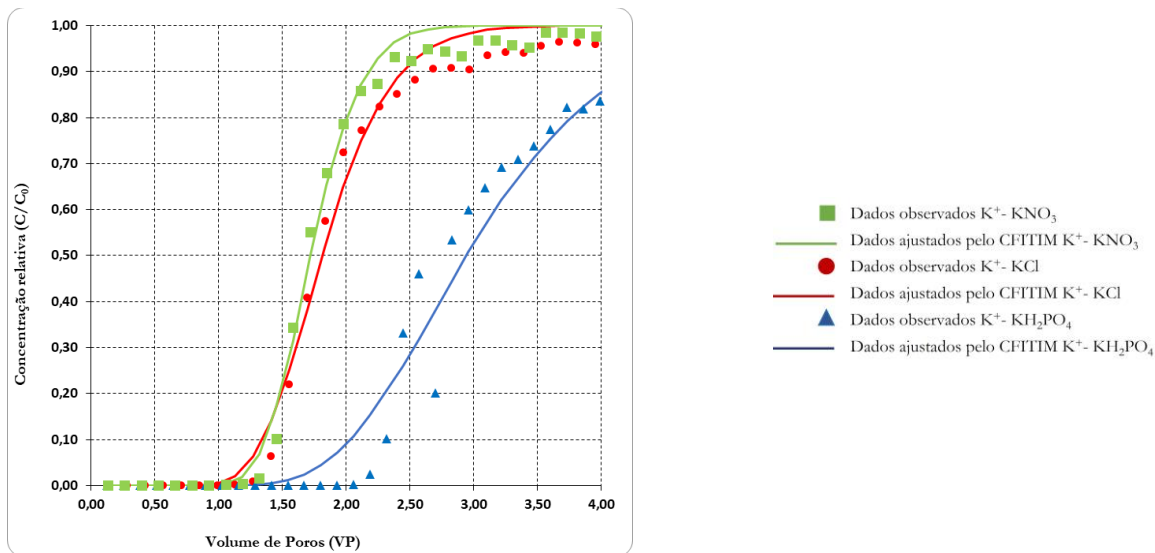
Este efeito de maior deslocamento do  $\text{NO}_3^-$  pode ser observado neste estudo, que obteve também menores valores de R. É provável que pelo fato da camada mais superior do solo possuir uma textura com maior fração de argila, inferida a partir da análise da Curva de Retenção de Água no Solo, houve essa repulsão da matriz do solo.

Rossi et al. (2007) estudaram o deslocamento no  $\text{NO}_3^-$  em colunas deformadas e indeformadas em dois tipos de solo, sendo classificado com textura argilosa e outro com textura média, ambos pertencente a classe dos Latossolos Vermelhos-Amarelos, utilizando como solução deslocadora o nitrato de cálcio a  $50 \text{ mg L}^{-1}$ . Similar ao constatado nesse estudo, foi evidenciado o efeito de repulsão do solo, ao nitrato, apresentando baixos valores de R e sendo rapidamente lixiviado, sendo necessários aproximadamente 2 VP para atingir a máxima concentração relativa, próximo ao 2,1 VP obtidos nas BTCs obtidas neste estudo.

Quando considerado o deslocamento do  $\text{K}^+$  acompanhado pelo  $\text{PO}_4^{3-}$ , não houve grande diferença nem entre os valores de R e nem no deslocamento das respectivas BTCs. Este fato pode ser explicado pelo fosfato ser pouco móvel em solos tropicais, como afirma Medeiros et al. (2021) e não necessariamente pela matriz sólida retê-lo essa pouca mobilidade acabou influenciando diretamente no deslocamento do  $\text{K}^+$ , mantendo o cátion em maior tempo de interação com a matriz do solo, demonstrando maiores fatores de retardamento (Tabela 12) e maiores deslocamento da curva à direita (Figuras 19 e 20), quando comparado com as outras soluções deslocadoras.

Carvalho et al. (2022) estudando o deslocamento de água residuária de suinocultura contendo fosfato e potássio, em um solo arenoso eletronegativo também constataram a tendência de serem retidos pelo solo, pelas BTCs estarem bastante deslocadas à direita, sendo o fosfato com maiores valores de fator de retardamento. Estes autores também quantificaram a concentração de nitrato, que obteve os menores valores desta variável e deslocamento mais à esquerda semelhante aos resultados obtidos nesse estudo. Os autores associaram ao fato do  $\text{NO}_3^-$  apresentar adsorção do tipo eletrostática não específica, com baixa afinidade pelos sítios de adsorção do solo, implicando em baixa interação química.

A Figura 20 apresenta uma compilação das BTCs mais bem ajustadas do Cloreto de Potássio, Nitrato de Potássio e Fosfato de Potássio, considerando apenas o movimento do íon  $\text{K}^+$ . É provável que mesmo com a lavagem do solo para remoção de grande parte dos íons, acabe permanecendo uma quantidade residual uma solução deslocadora com íons que interajam com a matriz sólida (lembrando que o cloreto foi utilizado nesse estudo como prova em branco), os ânions da solução deslocadora (como o  $\text{NO}_3^-$  e o  $\text{PO}_4^{3-}$ ) acabam se ligando aos cátions remanescente da matriz do solo, deslocando-os no sentido do fluxo, deixando sítios disponíveis para ligação com os cátions provenientes da solução deslocadora, que neste estudo foi o  $\text{K}^+$ . Logo, observou-se que ao comparar as curvas presentes no compilado da Figura 20, que ao aplicar uma solução deslocadora com ânions que reagem bem com a matriz do solo ( $\text{NO}_3^-$  e o  $\text{PO}_4^{3-}$ ), fez com que o  $\text{K}^+$ , sofresse uma maior retenção pela matriz do solo, deslocando as curvas desse cátion consideravelmente para a direita em comparação ao  $\text{Cl}^-$ , pouco reativo à matriz do solo.



**Figura 20.** Comparação do deslocamento do íon Potássio em função do íon acompanhante, utilizando as BTCs mais bem ajustadas de cada solução deslocadora.

No entanto, ao estudar a influência do íon acompanhante, tem-se que considerar o efeito do arraste causado pela massa atômica dos elementos que compõe a solução deslocadora. Dessa forma, pela Figura 20, pode-se observar ainda, o efeito do arraste do  $\text{NO}_3^-$  sobre o  $\text{K}^+$ , deslocando a curva mais a esquerda, quando comparado com o  $\text{Cl}^-$ , que possui massa atômica menor. Este efeito não pode ser constatado considerando o  $\text{PO}_4^{3-}$ , pois apesar de ter o peso atômico maior que os outros ânions, possui pouca mobilidade no solo como constatado por Medeiros et al. (2021) e Carvalho et al. (2022).

Medeiros et al. (2021) estudando o deslocamento do  $\text{PO}_4^{3-}$  em um Argissolo Distrófico Típico, também classificado como de textura média, utilizando como solução deslocadora o superfosfato simples, na concentração de  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ , constatou a não mobilidade desse ânion ao observar que o fósforo se concentrou no solo, uma vez que essa concentração não poderia ser considerada como retenção, uma vez que o solo, por apresentar maior número de cargas positivas (solo arenoso) adsorveu fortemente esse ânion. Os autores relacionam esse comportamento ao fato de que o fósforo possui baixa mobilidade no solo, dessa forma, não sofre grandes perdas por percolação.

O número de Peclet ( $P$ ) faz referência ao tipo de mecanismo predominante no transporte de solutos no solo: se o  $P$  for menor que 0,01 ocorre a predominância da difusão; se o  $P$  estiver entre 0,01 e 50, o mecanismo é misto de difusão e convecção-dispersão, e; se  $P$  maior que 50, o mecanismo é somente a convecção-dispersão (HUYSMANS e DASSARGUES, 2005). Dessa forma, pode-se observar que em todas as BTCs, independente da solução deslocadora, ocorreu uma predominância da junção dos mecanismos de difusão e convecção-dispersão.

O coeficiente de dispersão-difusão ( $D$ ), também chamado de coeficiente de difusão aparente ou dispersão longitudinal, ou coeficiente de dispersão hidrodinâmica consiste em um parâmetro físico da equação de transporte de solutos que expressa a adição de dois fenômenos de transporte: a dispersão mecânica, que se refere ao movimento diferencial do soluto quando percorrendo o solo, ocasionado proporcionado pela diferença entre as formas, diâmetros médios e direções dos poros no solo e; a difusão iônica que consiste no movimento natural dos constituintes que estão dissolvidos na solução em decorrência de gradientes de concentração (VAN GENUCHTEN et al., 1986).

A partir do  $D$ , obtém-se os valores de dispersividade ( $\lambda$ ), representando a rapidez com que um íon percorre determinada distância quando lixiviado. Observou-se valores similares de dispersividade para todos os íons,

considerados relativamente baixos, o que pode estar relacionado ao fato de que houve uma homogeneização do meio poroso ao acomodá-lo nas colunas. Este resultado também foi encontrado por Medeiros et al. (2021) analisando o fosfato, o potássio e o nitrato e por Rossi et al. (2007), analisando somente o nitrato. Rossi et al. (2007) ainda comparou os valores de dispersividade para o Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média para amostras deformadas ( $\lambda = 0,456$ ) e indeformadas ( $\lambda = 1,67$ ) e percebeu que o  $\text{NO}_3^-$  percorreu praticamente o dobro da distância na primeira em um mesmo período, ou seja, lixiviado mais rapidamente. BATISTA (2022) enfatiza que como  $\lambda$  é a relação entre  $D$  e  $v_m$ , quanto maior a  $v_m$ , menor a força de interação, pois pode reduzir o tempo de contato entre as partículas sólidas do solo e do fluido deslocador.

Ainda considerando o coeficiente de dispersão-difusão ( $D$ ), Nielsen e Biggar (1962) afirmam que existe uma relação em que para maiores valores de  $D$ , menores são as inclinações das BTCs, pelo fato de ocorrer um alargamento na faixa de mistura entre a solução deslocadora e a deslocado na coluna de solo, o que torna os acréscimos na concentração relativa baixo em proporção ao número de volume de poros. Este efeito pode ser observado ao comparar as repetições que tiveram maiores valores de  $D$  na Tabela 12 e suas respectivas BTC's pela Figura 19.

#### 4.4. Conclusões

Considerando o uso sustentável dos recursos naturais de áreas protegidas como a Floresta do Pau-Rosa, com o foco na recomendação de adubação para a cultura do guaraná, acredita-se que o íon mais susceptível a lixiviação no solo de estudo é o  $\text{NO}_3^-$  seguido pelo íon  $\text{K}^+$  e por fim, o  $\text{PO}_4^{3-}$ . Em termos práticos, o fertilizante fosfato monopotássico apresentou maior tempo de permanência no solo, ficando disponível às plantas e menores riscos de contaminação por lixiviação.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelo apoio logístico, nas coletas das amostras de solo e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudos. Agradecemos aos técnicos do Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP, Gilmar Grigolon e Paula Pedro, pelo apoio técnico. Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi pela concessão de parte dos equipamentos utilizados nesse estudo.



## Referências

- ARÊAS, V. F. Estudo experimental e analítico do transporte de contaminantes em meios porosos. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- BATISTA, A. M. Movimento de água e solutos na rizosfera. 2022. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
- DHINGRA, R.S.; SHAH, M. A holistic study on fluoride-contaminated groundwater models and its widespread effects in healthcare and irrigation. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 60329–60345, 2021.
- GARCIA, M. V. C.; LEITE, E. C. P.; PEDE, M. A. Z. SHINZATO, M. C. Avaliação do Parâmetro transmissividade de LNAPLs para caracterização de áreas contaminadas no estado de São Paulo. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n.6, p. 1085 – 1095, 2021.
- HUYNMANS, M.; DASSARGUES, A. Review of the use of Peclet numbers to determine the relative importance of advection and diffusion in low permeability environments. *Hidrogeology Journal*, v.15, n. 5-6, p.895-904, 2005.
- LAPIDUS, L.; AMUNDSON, N. R. Mathematics of Adsorption in Beds. VI. The Effect of Longitudinal Diffusion in Ion Exchange and Chromatographic Columns. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 56, n. 8, p. 984–988, 1952.
- MIRANDA, J. H. Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. 2001. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.
- MEDEIROS, P. R. F.; FERREIRA, M. S.; MIRANDA, J. H.; GUIMARÃES, M. J. M.; BARROS, A. C.; UYEDA, C. A. Dinâmica do potássio, cloro e fósforo em solo da região do submédio do vale do Rio São Francisco. *Irriga*, v. 26, n. 2, p. 315 – 327, 202
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement in soils. I. Experimental information. *Soil Science Society of America Journal*, v. 5, p. 1-5, 1961.
- OLIVEIRA, L. F. C.; NOGUEIRA, J. G.; FRIZZARIM, S. S.; FIA, R.; FREITAS, J. S.; FIA, F. R. L. Sorção e mobilidade do lítio em solos de áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 139-148, 2013.
- PAVODESE, P. P. Movimento e perdas de nitrogênio e potássio num solo com cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*). 1988. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- PEREIRA, E. M.; CHANG, H. K.; SOTO, M. G. A. Estimativa de alguns parâmetros de transporte de contaminantes para solos brasileiros. *Geociências*, v. 30, n. 3., p. 383-398, 2011.
- REBOUÇAS, C. A. M. Deslocamento miscível dos íons sulfato e potássio e potássio em latossolos. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- RAIJ, B.V. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no solo. São Paulo: ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1998. 88 p.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 8, 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>>, acesso em: 10/03/2023.

- ROSSI, P.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N. Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 3, p.675 – 682, 2007.
- SHU, X.; WU, Y.; ZHANG, X.; YU, F. Experiments and models for contaminant transport in unsaturated and saturated porous media – A review. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 192, 606-621, 2023.
- VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective  $K_d$  approach. *Water Resources Research*, v. 20, n. 4, p.499-503, 1984.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-897, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. Analytical solutions for chemical transport with simultaneous adsorption, zero order production and first order decay. *Journal of Hydrology*, v. 49, n. 3-4, p. 213-233, 1981.
- VAN GENUCHTEN, M. Th.; ŠIMŮNEK, J.; LEJJI, F. J.; TORIDE, N.; ŠEJNA, M. STANMOD: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 55, n.4, p. 1353-1366, 2012.
- VAN GENUCHTEN, M. Th.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: BLACK, C.A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.1025-54. (*American Society of Agronomy*, 9)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos e nas condições em que foi conduzida a pesquisa, pode-se concluir finalmente que:

- I. O Rio Amana, localizado na Flona do Pau-Rosa apresenta impactos ambientais físicos evidentes, como assoreamento, estreitamento do leito do rio e turbidez das águas causados pelo garimpo ilegal de ouro. Os gestores da Flona vêm alertando sobre a irregularidade e estimulado os moradores a desenvolverem outras atividades, dentre elas a agricultura sustentável, focando em duas culturas industriais com boa rentabilidade: o Pau-rosa e o guaraná da Amazônia.
  
- II. O solo coletado na Flona apresenta elevada acidez ( $\text{pH} = 3,90$ ) e baixa fertilidade, típico de Latossolos Amarelo amazônicos, com teores baixos de Magnésio e Potássio, teores muito baixos de Cálcio e Fósforo, teor médio de Boro e alto de Enxofre. Analisando os parâmetros da CRA para as três diferentes profundidades do perfil, observou-se pouca variação do conteúdo de água entre elas, porém é provável que a camada superior possua maior teor na fração argila, pelo maior desempenho na retenção de água. O conteúdo de água de saturação ( $\theta_s$ ), que é numericamente igual à porosidade do solo ( $\alpha$ ), variou entre 0,4271 e 0,4533  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0-20 > 40 - 60 > 20 - 40 cm. que 20 - 40 cm. O conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ) variou entre 0,0990 e 0,1058  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 40 - 60 > 0 - 20 cm. O parâmetro  $\lambda$  variou entre 0,661 e 0,0732, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 20 - 40 > 0 - 20 > 40 - 60 cm. O valor de  $n$  variou entre 1,5774 e 1,6812, seguindo a ordem decrescente de valores nos perfis 0 - 20 > 40 - 60 > 20 - 40 cm. Como  $m$  é calculado a partir do  $n$ , os valores seguiram a mesma tendência. O solo possui boa permeabilidade, representada pela condutividade hidráulica, classificada como moderada ( $K_{\text{sat}} = 4,15 \text{ cm h}^{-1}$ ). Conclui-se que para aumento da produtividade das culturas agrícolas, em ascensão na região como o Guaraná da Amazônia, haja necessidade de correção da acidez do solo, bem como recomendação de adubação, tornando relevantes estudos sobre o movimento dos solutos neste solo, visto que a área pertence à uma Unidade de Conservação e os recursos devem ser utilizados de forma sustentável.
  
- III. Considerando o uso sustentável dos recursos naturais de áreas protegidas como a Floresta do Pau-Rosa, diante dos resultados obtidos, notou-se que o íon mais susceptível a lixiviação no solo de estudo é o  $\text{NO}_3^-$  seguido pelo íon  $\text{K}^+$  e por fim, o  $\text{PO}_4^{3-}$ . Atualmente os moradores da região não realizam adubação do guaraná, o qual é cultivado sem tratamentos culturais específicos. Em termos práticos, o fertilizante fosfato monopotássico apresentou maior tempo de permanência no solo, ficando disponível às plantas e menores riscos de contaminação por lixiviação.

## ANEXOS

**ANEXO A.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de KCl. Repetição I.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,39	0,00	0,00
4	0,53	0,00	0,00
5	0,66	0,00	0,00
6	0,79	0,01	0,00
7	0,92	0,02	0,01
8	1,05	0,04	0,03
9	1,18	0,07	0,07
10	1,31	0,12	0,14
11	1,45	0,18	0,24
12	1,58	0,28	0,34
13	1,71	0,43	0,44
14	1,84	0,59	0,55
15	1,97	0,70	0,64
16	2,10	0,78	0,72
17	2,23	0,85	0,78
18	2,37	0,85	0,84
19	2,50	0,88	0,88
20	2,63	0,88	0,92
21	2,76	0,88	0,94
22	2,89	0,89	0,96
23	3,02	0,90	0,97
24	3,15	0,92	0,98
25	3,29	0,93	0,99
26	3,42	0,92	0,99
27	3,55	0,90	0,99
28	3,68	0,94	1,00
29	3,81	0,92	1,00
30	3,94	0,97	1,00
31	4,07	0,99	1,00
32	4,21	0,86	1,00
33	4,34	0,94	1,00
34	4,47	0,94	1,00
35	4,60	0,97	1,00
36	4,73	0,97	1,00
37	4,86	0,96	1,00
38	4,99	0,94	1,00
39	5,13	0,96	1,00
40	5,26	0,96	1,00
41	5,39	0,97	1,00
42	5,52	0,99	1,00
43	5,65	0,94	1,00
44	5,78	1,01	1,00
45	5,91	0,97	1,00
46	6,05	1,01	1,00
47	6,18	1,00	1,00
48	6,31	0,99	1,00
49	6,44	0,96	1,00
50	6,57	0,95	1,00

**ANEXO B.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de KCl. Repetição II

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,14	0,00	0,00
2	0,28	0,00	0,00
3	0,42	0,00	0,00
4	0,56	0,00	0,00
5	0,71	0,00	0,00
6	0,85	0,00	0,00
7	0,99	0,00	0,00
8	1,13	0,00	0,02
9	1,27	0,01	0,06
10	1,41	0,06	0,14
11	1,55	0,22	0,25
12	1,69	0,41	0,38
13	1,83	0,58	0,52
14	1,98	0,72	0,65
15	2,12	0,77	0,75
16	2,26	0,82	0,83
17	2,40	0,85	0,89
18	2,54	0,88	0,93
19	2,68	0,91	0,96
20	2,82	0,91	0,97
21	2,96	0,90	0,98
22	3,11	0,94	0,99
23	3,25	0,94	1,00
24	3,39	0,94	1,00
25	3,53	0,96	1,00
26	3,67	0,96	1,00
27	3,81	0,96	1,00
28	3,95	0,96	1,00
29	4,09	0,96	1,00
30	4,23	0,97	1,00
31	4,38	0,98	1,00
32	4,52	0,98	1,00
33	4,66	0,97	1,00
34	4,80	0,97	1,00
35	4,94	0,97	1,00
36	5,08	0,98	1,00
37	5,22	0,98	1,00
38	5,36	0,97	1,00
39	5,50	0,97	1,00
40	5,65	0,98	1,00
41	5,79	0,98	1,00
42	5,93	0,97	1,00
43	6,07	0,98	1,00
44	6,21	0,97	1,00
45	6,35	0,97	1,00
46	6,49	0,96	1,00
47	6,63	0,96	1,00
48	6,78	0,98	1,00
49	6,92	0,99	1,00
50	7,06	0,97	1,00

**ANEXO C.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de KCl. Repetição III.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,14	0,00	0,00
2	0,28	0,00	0,00
3	0,41	0,00	0,00
4	0,55	0,00	0,00
5	0,69	0,00	0,00
6	0,83	0,00	0,00
7	0,97	0,00	0,00
8	1,10	0,00	0,02
9	1,24	0,03	0,08
10	1,38	0,12	0,19
11	1,52	0,35	0,35
12	1,66	0,59	0,52
13	1,80	0,73	0,67
14	1,93	0,81	0,79
15	2,07	0,85	0,87
16	2,21	0,87	0,93
17	2,35	0,87	0,96
18	2,49	0,92	0,98
19	2,62	0,93	0,99
20	2,76	0,92	1,00
21	2,90	0,92	1,00
22	3,04	0,92	1,00
23	3,18	0,90	1,00
24	3,31	0,93	1,00
25	3,45	0,94	1,00
26	3,59	0,96	1,00
27	3,73	0,97	1,00
28	3,87	0,96	1,00
29	4,00	0,95	1,00
30	4,14	0,97	1,00
31	4,28	0,94	1,00
32	4,42	0,95	1,00
33	4,56	0,95	1,00
34	4,69	0,95	1,00
35	4,83	0,96	1,00
36	4,97	0,96	1,00
37	5,11	0,96	1,00
38	5,25	0,96	1,00
39	5,39	0,97	1,00
40	5,52	0,97	1,00
41	5,66	0,95	1,00
42	5,80	0,95	1,00
43	5,94	0,94	1,00
44	6,08	0,95	1,00
45	6,21	0,95	1,00
46	6,35	0,95	1,00
47	6,49	0,97	1,00
48	6,63	0,96	1,00
49	6,77	0,96	1,00
50	6,90	0,97	1,00

**ANEXO D.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição I

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,40	0,00	0,00
4	0,53	0,00	0,00
5	0,66	0,00	0,00
6	0,79	0,00	0,00
7	0,92	0,00	0,00
8	1,06	0,00	0,00
9	1,19	0,00	0,02
10	1,32	0,02	0,07
11	1,45	0,10	0,17
12	1,58	0,34	0,32
13	1,72	0,55	0,50
14	1,85	0,68	0,65
15	1,98	0,79	0,78
16	2,11	0,86	0,87
17	2,24	0,87	0,93
18	2,38	0,93	0,96
19	2,51	0,92	0,98
20	2,64	0,95	0,99
21	2,77	0,94	1,00
22	2,90	0,93	1,00
23	3,04	0,97	1,00
24	3,17	0,97	1,00
25	3,30	0,96	1,00
26	3,43	0,95	1,00
27	3,56	0,99	1,00
28	3,70	0,99	1,00
29	3,83	0,98	1,00
30	3,96	0,98	1,00
31	4,09	0,99	1,00
32	4,22	0,99	1,00
33	4,36	0,98	1,00
34	4,49	0,99	1,00
35	4,62	1,00	1,00
36	4,75	1,00	1,00
37	4,88	1,01	1,00
38	5,02	0,99	1,00
39	5,15	1,00	1,00
40	5,28	0,96	1,00
41	5,41	0,98	1,00
42	5,54	0,99	1,00
43	5,68	0,99	1,00
44	5,81	1,00	1,00
45	5,94	0,95	1,00
46	6,07	1,00	1,00
47	6,20	0,99	1,00
48	6,33	1,01	1,00
49	6,47	1,01	1,00
50	6,60	0,99	1,00

**ANEXO E.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição II.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,01	0,00
2	0,27	0,01	0,00
3	0,40	0,01	0,00
4	0,54	0,00	0,00
5	0,67	0,01	0,00
6	0,80	0,00	0,00
7	0,94	0,01	0,00
8	1,07	0,01	0,01
9	1,20	0,01	0,02
10	1,34	0,01	0,05
11	1,47	0,01	0,10
12	1,61	0,04	0,17
13	1,74	0,20	0,26
14	1,87	0,39	0,35
15	2,01	0,53	0,46
16	2,14	0,66	0,55
17	2,28	0,71	0,64
18	2,41	0,77	0,72
19	2,54	0,80	0,78
20	2,68	0,82	0,84
21	2,81	0,84	0,88
22	2,95	0,85	0,91
23	3,08	0,88	0,94
24	3,21	0,88	0,95
25	3,35	0,89	0,97
26	3,48	0,91	0,98
27	3,61	0,90	0,98
28	3,75	0,91	0,99
29	3,88	0,89	0,99
30	4,02	0,93	1,00
31	4,15	0,96	1,00
32	4,28	0,89	1,00
33	4,42	0,97	1,00
34	4,55	0,93	1,00
35	4,69	0,94	1,00
36	4,82	0,95	1,00
37	4,95	0,94	1,00
38	5,09	0,97	1,00
39	5,22	0,94	1,00
40	5,35	0,95	1,00
41	5,49	0,98	1,00
42	5,62	0,93	1,00
43	5,76	0,92	1,00
44	5,89	0,98	1,00
45	6,02	0,95	1,00
46	6,16	0,96	1,00
47	6,29	0,96	1,00
48	6,43	0,94	1,00
49	6,56	0,95	1,00
50	6,69	0,94	1,00

**ANEXO F.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição III

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,14	0,00	0,00
2	0,28	0,00	0,00
3	0,42	0,00	0,00
4	0,56	0,00	0,00
5	0,70	0,00	0,00
6	0,83	0,00	0,01
7	0,97	0,00	0,02
8	1,11	0,00	0,04
9	1,25	0,00	0,08
10	1,39	0,01	0,12
11	1,53	0,04	0,18
12	1,67	0,14	0,24
13	1,81	0,27	0,30
14	1,95	0,39	0,37
15	2,09	0,50	0,43
16	2,23	0,57	0,50
17	2,37	0,65	0,55
18	2,50	0,71	0,60
19	2,64	0,74	0,65
20	2,78	0,76	0,70
21	2,92	0,80	0,74
22	3,06	0,79	0,77
23	3,20	0,82	0,81
24	3,34	0,83	0,83
25	3,48	0,87	0,86
26	3,62	0,85	0,88
27	3,76	0,86	0,90
28	3,90	0,85	0,91
29	4,04	0,86	0,92
30	4,17	0,87	0,94
31	4,31	0,87	0,95
32	4,45	0,88	0,95
33	4,59	0,88	0,96
34	4,73	0,88	0,97
35	4,87	0,89	0,97
36	5,01	0,90	0,98
37	5,15	0,90	0,98
38	5,29	0,95	0,98
39	5,43	0,89	0,99
40	5,57	0,92	0,99
41	5,71	0,93	0,99
42	5,84	0,93	0,99
43	5,98	0,93	0,99
44	6,12	0,90	0,99
45	6,26	0,92	1,00
46	6,40	0,93	1,00
47	6,54	0,94	1,00
48	6,68	0,91	1,00
49	6,82	0,93	1,00
50	6,96	0,96	1,00

**ANEXO G.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon nitrato com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição I.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,40	0,00	0,00
4	0,53	0,00	0,00
5	0,66	0,00	0,00
6	0,79	0,00	0,00
7	0,92	0,00	0,00
8	1,06	0,02	0,03
9	1,19	0,00	0,13
10	1,32	0,41	0,33
11	1,45	0,59	0,57
12	1,58	0,76	0,77
13	1,72	0,89	0,90
14	1,85	0,87	0,96
15	1,98	0,96	0,99
16	2,11	1,02	1,00
17	2,24	1,01	1,00
18	2,38	1,04	1,00
19	2,51	1,03	1,00
20	2,64	1,03	1,00
21	2,77	1,03	1,00
22	2,90	0,98	1,00
23	3,04	1,02	1,00
24	3,17	1,03	1,00
25	3,30	0,99	1,00
26	3,43	0,98	1,00
27	3,56	1,00	1,00
28	3,70	0,98	1,00
29	3,83	0,96	1,00
30	3,96	0,96	1,00
31	4,09	0,86	1,00
32	4,22	0,88	1,00
33	4,36	0,95	1,00
34	4,49	0,95	1,00
35	4,62	0,92	1,00
36	4,75	0,88	1,00
37	4,88	0,88	1,00
38	5,02	0,91	1,00
39	5,15	0,88	1,00
40	5,28	0,96	1,00
41	5,41	0,87	1,00
42	5,54	0,93	1,00
43	5,68	0,93	1,00
44	5,81	0,87	1,00
45	5,94	0,90	1,00
46	6,07	0,96	1,00
47	6,20	0,93	1,00
48	6,33	0,98	1,00
49	6,47	1,00	1,00
50	6,60	0,99	1,00

**ANEXO H.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon nitrato com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição II

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,01	0,00
2	0,27	0,00	0,00
3	0,40	0,00	0,00
4	0,54	0,00	0,00
5	0,67	0,00	0,00
6	0,80	0,00	0,00
7	0,94	0,00	0,02
8	1,07	0,02	0,08
9	1,20	0,15	0,20
10	1,34	0,37	0,37
11	1,47	0,62	0,54
12	1,61	0,74	0,69
13	1,74	0,78	0,81
14	1,87	0,84	0,88
15	2,01	0,97	0,94
16	2,14	0,89	0,97
17	2,28	0,88	0,98
18	2,41	0,94	0,99
19	2,54	0,93	1,00
20	2,68	0,93	1,00
21	2,81	0,99	1,00
22	2,95	0,84	1,00
23	3,08	0,93	1,00
24	3,21	0,94	1,00
25	3,35	0,96	1,00
26	3,48	0,94	1,00
27	3,61	0,92	1,00
28	3,75	0,84	1,00
29	3,88	0,83	1,00
30	4,02	0,70	1,00
31	4,15	0,74	1,00
32	4,28	0,77	1,00
33	4,42	0,84	1,00
34	4,55	0,82	1,00
35	4,69	0,86	1,00
36	4,82	0,78	1,00
37	4,95	0,94	1,00
38	5,09	1,07	1,00
39	5,22	0,86	1,00
40	5,35	0,92	1,00
41	5,49	0,84	1,00
42	5,62	0,86	1,00
43	5,76	0,78	1,00
44	5,89	0,89	1,00
45	6,02	0,93	1,00
46	6,16	0,86	1,00
47	6,29	0,82	1,00
48	6,43	0,98	1,00
49	6,56	0,88	1,00
50	6,69	0,93	1,00

**ANEXO I.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon nitrato com a solução deslocadora de  $KNO_3$ . Repetição III.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,14	0,00	0,00
2	0,28	0,00	0,00
3	0,42	0,00	0,00
4	0,56	0,00	0,00
5	0,70	0,00	0,02
6	0,83	0,00	0,05
7	0,97	0,04	0,11
8	1,11	0,06	0,19
9	1,25	0,20	0,28
10	1,39	0,40	0,38
11	1,53	0,55	0,47
12	1,67	0,65	0,55
13	1,81	0,68	0,63
14	1,95	0,76	0,70
15	2,09	0,76	0,75
16	2,23	0,82	0,80
17	2,37	0,88	0,84
18	2,50	0,89	0,87
19	2,64	0,88	0,89
20	2,78	0,85	0,92
21	2,92	0,95	0,93
22	3,06	0,94	0,95
23	3,20	0,94	0,96
24	3,34	0,90	0,97
25	3,48	0,91	0,97
26	3,62	0,96	0,98
27	3,76	0,90	0,98
28	3,90	0,81	0,99
29	4,04	0,77	0,99
30	4,17	0,88	0,99
31	4,31	0,82	0,99
32	4,45	0,91	1,00
33	4,59	0,84	1,00
34	4,73	0,93	1,00
35	4,87	0,85	1,00
36	5,01	0,84	1,00
37	5,15	0,86	1,00
38	5,29	0,85	1,00
39	5,43	0,75	1,00
40	5,57	0,79	1,00
41	5,71	0,84	1,00
42	5,84	0,84	1,00
43	5,98	0,91	1,00
44	6,12	0,81	1,00
45	6,26	0,99	1,00
46	6,40	0,84	1,00
47	6,54	0,81	1,00
48	6,68	0,82	1,00
49	6,82	0,84	1,00
50	6,96	0,77	1,00

**ANEXO J.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KH_2PO_4$ . Repetição I.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,15	0,00	0,00
2	0,29	0,00	0,00
3	0,44	0,00	0,00
4	0,59	0,00	0,00
5	0,73	0,00	0,00
6	0,88	0,01	0,00
7	1,02	0,00	0,00
8	1,17	0,00	0,00
9	1,32	0,00	0,00
10	1,46	0,00	0,01
11	1,61	0,00	0,02
12	1,76	0,00	0,05
13	1,90	0,00	0,07
14	2,05	0,00	0,11
15	2,19	0,01	0,16
16	2,34	0,08	0,21
17	2,49	0,20	0,27
18	2,63	0,34	0,33
19	2,78	0,46	0,39
20	2,93	0,53	0,45
21	3,07	0,61	0,51
22	3,22	0,64	0,56
23	3,36	0,69	0,61
24	3,51	0,70	0,66
25	3,66	0,75	0,71
26	3,80	0,80	0,74
27	3,95	0,81	0,78
28	4,10	0,84	0,81
29	4,24	0,83	0,84
30	4,39	0,86	0,86
31	4,54	0,86	0,88
32	4,68	0,87	0,90
33	4,83	0,85	0,92
34	4,97	0,87	0,93
35	5,12	0,89	0,94
36	5,27	0,89	0,95
37	5,41	0,89	0,96
38	5,56	0,88	0,97
39	5,71	0,87	0,97
40	5,85	0,88	0,98
41	6,00	0,86	0,98
42	6,14	0,87	0,98
43	6,29	0,87	0,99
44	6,44	0,90	0,99
45	6,58	0,89	0,99
46	6,73	0,89	0,99
47	6,88	0,89	0,99
48	7,02	0,90	1,00
49	7,17	0,91	1,00
50	7,31	0,91	1,00



**ANEXO K.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KH_2PO_4$ . Repetição II.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,39	0,00	0,00
4	0,51	0,00	0,00
5	0,64	0,00	0,00
6	0,77	0,00	0,00
7	0,90	0,00	0,00
8	1,03	0,00	0,00
9	1,16	0,00	0,00
10	1,29	0,00	0,00
11	1,41	0,00	0,01
12	1,54	0,00	0,01
13	1,67	0,00	0,02
14	1,80	0,00	0,04
15	1,93	0,00	0,07
16	2,06	0,00	0,11
17	2,19	0,02	0,15
18	2,32	0,10	0,21
19	2,44	0,33	0,26
20	2,57	0,46	0,32
21	2,70	0,20	0,38
22	2,83	0,53	0,45
23	2,96	0,60	0,51
24	3,09	0,65	0,57
25	3,22	0,69	0,62
26	3,34	0,71	0,67
27	3,47	0,74	0,71
28	3,60	0,77	0,76
29	3,73	0,82	0,79
30	3,86	0,82	0,82
31	3,99	0,84	0,85
32	4,12	0,85	0,88
33	4,24	0,86	0,90
34	4,37	0,88	0,91
35	4,50	0,89	0,93
36	4,63	0,89	0,94
37	4,76	0,89	0,95
38	4,89	0,88	0,96
39	5,02	0,89	0,97
40	5,14	0,91	0,97
41	5,27	0,94	0,98
42	5,40	0,92	0,98
43	5,53	0,91	0,99
44	5,66	0,92	0,99
45	5,79	0,91	0,99
46	5,92	0,92	0,99
47	6,04	0,91	0,99
48	6,17	0,92	1,00
49	6,30	0,91	1,00
50	6,43	0,98	1,00

**ANEXO L.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon potássio com a solução deslocadora de  $KH_2PO_4$ . Repetição III.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,38	0,00	0,00
4	0,51	0,00	0,00
5	0,64	0,00	0,00
6	0,77	0,01	0,00
7	0,90	0,00	0,00
8	1,02	0,00	0,00
9	1,15	0,00	0,00
10	1,28	0,00	0,01
11	1,41	0,00	0,02
12	1,54	0,00	0,05
13	1,66	0,00	0,07
14	1,79	0,00	0,11
15	1,92	0,01	0,16
16	2,05	0,08	0,21
17	2,18	0,20	0,27
18	2,30	0,34	0,32
19	2,43	0,46	0,39
20	2,56	0,53	0,45
21	2,69	0,61	0,51
22	2,82	0,64	0,56
23	2,94	0,69	0,61
24	3,07	0,70	0,66
25	3,20	0,75	0,71
26	3,33	0,80	0,75
27	3,46	0,81	0,78
28	3,58	0,84	0,81
29	3,71	0,83	0,84
30	3,84	0,86	0,86
31	3,97	0,86	0,89
32	4,10	0,87	0,90
33	4,22	0,85	0,92
34	4,35	0,87	0,93
35	4,48	0,89	0,94
36	4,61	0,89	0,95
37	4,74	0,89	0,96
38	4,86	0,88	0,97
39	4,99	0,87	0,97
40	5,12	0,88	0,98
41	5,25	0,86	0,98
42	5,38	0,87	0,98
43	5,50	0,87	0,99
44	5,63	0,90	0,99
45	5,76	0,89	0,99
46	5,89	0,89	0,99
47	6,02	0,89	0,99
48	6,14	0,90	1,00
49	6,27	0,91	1,00
50	6,40	0,91	1,00

**ANEXO M.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon fosfato com a solução deslocadora de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Repetição I.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,15	0,00	0,00
2	0,29	0,00	0,00
3	0,44	0,00	0,00
4	0,59	0,00	0,00
5	0,73	0,00	0,00
6	0,88	0,00	0,00
7	1,02	0,00	0,00
8	1,17	0,00	0,00
9	1,32	0,00	0,00
10	1,46	0,00	0,00
11	1,61	0,00	0,00
12	1,76	0,00	0,00
13	1,90	0,00	0,01
14	2,05	0,00	0,02
15	2,19	0,00	0,04
16	2,34	0,00	0,07
17	2,49	0,00	0,12
18	2,63	0,03	0,17
19	2,78	0,13	0,23
20	2,93	0,53	0,30
21	3,07	0,35	0,37
22	3,22	0,45	0,44
23	3,36	0,54	0,51
24	3,51	0,69	0,58
25	3,66	0,67	0,65
26	3,80	0,68	0,70
27	3,95	0,76	0,75
28	4,10	0,80	0,80
29	4,24	0,84	0,83
30	4,39	1,00	0,87
31	4,54	0,86	0,89
32	4,68	0,84	0,91
33	4,83	0,85	0,93
34	4,97	0,88	0,95
35	5,12	0,89	0,96
36	5,27	0,90	0,97
37	5,41	0,89	0,98
38	5,56	0,90	0,98
39	5,71	0,93	0,99
40	5,85	0,92	0,99
41	6,00	0,94	0,99
42	6,14	0,92	0,99
43	6,29	0,94	1,00
44	6,44	0,95	1,00
45	6,58	0,95	1,00
46	6,73	0,93	1,00
47	6,88	0,95	1,00
48	7,02	0,94	1,00
49	7,17	0,95	1,00
50	7,31	0,95	1,00

**ANEXO N.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon fosfato com a solução deslocadora de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Repetição II.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,39	0,00	0,00
4	0,51	0,00	0,00
5	0,64	0,00	0,00
6	0,77	0,00	0,00
7	0,90	0,00	0,00
8	1,03	0,00	0,00
9	1,16	0,00	0,00
10	1,29	0,00	0,00
11	1,41	0,00	0,00
12	1,54	0,00	0,01
13	1,67	0,00	0,01
14	1,80	0,00	0,03
15	1,93	0,00	0,05
16	2,06	0,00	0,08
17	2,19	0,00	0,13
18	2,32	0,06	0,18
19	2,44	0,29	0,23
20	2,57	0,43	0,30
21	2,70	0,17	0,37
22	2,83	0,53	0,44
23	2,96	0,61	0,51
24	3,09	0,67	0,58
25	3,22	0,71	0,64
26	3,34	0,77	0,70
27	3,47	0,76	0,75
28	3,60	0,79	0,79
29	3,73	0,82	0,83
30	3,86	0,82	0,86
31	3,99	0,79	0,89
32	4,12	0,86	0,91
33	4,24	0,90	0,93
34	4,37	0,90	0,94
35	4,50	0,90	0,96
36	4,63	0,91	0,97
37	4,76	0,92	0,97
38	4,89	0,92	0,98
39	5,02	0,93	0,98
40	5,14	0,94	0,99
41	5,27	0,94	0,99
42	5,40	0,95	0,99
43	5,53	0,94	0,99
44	5,66	0,96	1,00
45	5,79	0,97	1,00
46	5,92	0,97	1,00
47	6,04	0,97	1,00
48	6,17	0,99	1,00
49	6,30	1,01	1,00
50	6,43	0,98	1,00

**ANEXO O.** Valores do volume de poros (VP) e concentração relativas ( $C/C_0$ ) do íon fosfato com a solução deslocadora de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Repetição III.

Frasco	VP	$C/C_0$	Ajustados
1	0,13	0,00	0,00
2	0,26	0,00	0,00
3	0,38	0,00	0,00
4	0,51	0,00	0,00
5	0,64	0,00	0,00
6	0,77	0,02	0,00
7	0,90	0,00	0,00
8	1,02	0,00	0,00
9	1,15	0,00	0,00
10	1,28	0,00	0,00
11	1,41	0,00	0,00
12	1,54	0,00	0,01
13	1,66	0,00	0,03
14	1,79	0,00	0,06
15	1,92	0,00	0,10
16	2,05	0,04	0,16
17	2,18	0,15	0,23
18	2,30	0,31	0,31
19	2,43	0,44	0,39
20	2,56	0,56	0,48
21	2,69	0,67	0,56
22	2,82	0,70	0,64
23	2,94	0,75	0,70
24	3,07	0,76	0,76
25	3,20	0,82	0,81
26	3,33	0,80	0,86
27	3,46	1,01	0,89
28	3,58	0,83	0,91
29	3,71	0,84	0,94
30	3,84	0,85	0,95
31	3,97	0,87	0,97
32	4,10	0,89	0,97
33	4,22	0,88	0,98
34	4,35	0,88	0,99
35	4,48	0,90	0,99
36	4,61	0,90	0,99
37	4,74	0,90	1,00
38	4,86	0,91	1,00
39	4,99	0,93	1,00
40	5,12	0,88	1,00
41	5,25	0,96	1,00
42	5,38	0,87	1,00
43	5,50	0,91	1,00
44	5,63	0,91	1,00
45	5,76	0,89	1,00
46	5,89	0,91	1,00
47	6,02	0,93	1,00
48	6,14	0,91	1,00
49	6,27	0,91	1,00
50	6,40	0,97	1,00