

**MARCELA MERIDES CARVALHO**

**Avaliação do solo de áreas mineradas em recuperação dentro do bioma amazônico por meio da relação entre morfometria de agregados do solo e teor de glomalina.**

Sorocaba  
2021

**MARCELA MERIDES CARVALHO**

**Avaliação do solo de áreas mineradas em recuperação dentro do bioma amazônico por meio da relação entre morfometria de agregados do solo e teor de glomalina.**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” na Área de Concentração: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Admilson Irio Ribeiro

Sorocaba  
2021

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências ambientais  unesp  
Sorocaba

C331a                      Carvalho, Marcela Merides  
                                 Avaliação do solo de áreas mineradas em recuperação dentro do bioma amazônico por meio da relação entre morfometria de agregados do solo e teor de glomalina. / Marcela Merides Carvalho. -- Sorocaba, 2021  
                                 108 p. : il., tabs., mapas  
  
                                 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba  
                                 Orientador: Admilson Irio Ribeiro  
  
                                 1. Recuperação de Área Degradada. 2. Qualidade do solo. 3. Indicador ambiental. 4. Microbiologia. 5. Agregação do solo.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Avaliação de áreas mineradas em recuperação dentro do bioma amazônico por meio da relação entre morfometria de agregados do solo e teor de glomalina

**AUTORA: MARCELA MERIDES CARVALHO**

**ORIENTADOR: ADMILSON IRIO RIBEIRO**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ADMILSON IRIO RIBEIRO (Participação Virtual)  
Engenharia Ambiental / Unesp - ICT Sorocaba




Prof. Dr. AFONSO PECHE FILHO (Participação Virtual)  
Centro de Engenharia e Automação (CEA) / Instituto Agronômico de Campinas (IAC)

Dr<sup>a</sup>. CRISTIANE FIGUEIRA DA SILVA (Participação Virtual)  
Instituto Federal Rural do Rio de Janeiro

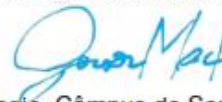


Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA LUCIA SOLERA (Participação Virtual)  
Instituto de Pesquisa Tecnológica - Recursos Florestais

 MARIA LUCIA  
SOLERA:00640765807

Assinado de forma digital por MARIA  
LUCIA SOLERA:00640765807  
Dados: 2021.03.18 19:43:30 -03'00'

Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia, Câmpus de Sorocaba, Unesp



Sorocaba, 18 de março de 2021

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais como pequeno gesto de retribuição ao amor e dedicação que sempre tiveram para comigo.

Com todo meu amor,

**Dedico.**

Ao meu marido querido Felipe Fengler pelo apoio, incentivo, amor, carinho e companheirismo durante esta jornada.

**Ofereço.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a DEUS, que me deu condições de entrar e permanecer no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PGCA) no mestrado e doutorado, possibilitando o encontro com pessoas muito especiais durante esses anos.

Aos meus pais, José Carlos (In memoriam) e Tita, que tanto amo, pela base familiar, educação e pela imensa dedicação, mesmo diante dos obstáculos enfrentados e das conquistas alcançadas, construímos uma família feliz e forte sustentada pelo amor.

As minhas irmãs, Bruna e Stela, aos meus cunhados Edson e Jadson, e meus sobrinhos, Arthur e Bianca pelo privilégio de viver ao lado de cada um de vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Admílson Írio Ribeiro pela oportunidade, liberdade e confiança que foram à base da realização deste trabalho. Agradeço também por ser mais que um orientador, por ser amigo, padrinho e conselheiro.

A Prof Dra Regina Márcia Longo e Empresa Mineradora pelo material que foram fundamentais para a realização desse projeto e pelas boas risadas.

Ao meu marido, companheiro de estudo e aventuras, Felipe Fengler por sempre estar ao meu lado, por acreditar em mim, por dividir seus conhecimentos comigo e por não me deixar desistir. Não teria conseguido sem você!

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia - Unesp Sorocaba e o Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PGCA), pelo suporte institucional e empenho na formação de pessoas.

Aos brilhantes professores da PGCA por contribuírem não apenas com esse trabalho, mas por me inspirarem como profissional.

A todos meus amigos da PGCA, em especial Vivian Lira, Leda Nogueira, Cristina Correa por dividir sorrisos e Suzan Lessa por me ajudar nas análises desse trabalho com tanta alegria e disposição.

A toda minha família, professores e amigos pela compreensão, carinho, apoio e orações que me sustentaram, principalmente no final do doutorado quando eu achei que não conseguiria.

**MUITO OBRIGADA!**

CARVALHO, M. M. **Avaliação do solo de áreas mineradas em recuperação dentro do bioma amazônico por meio da relação entre morfometria de agregados do solo e teor de glomalina.** 2021. 108f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2021.

---

## RESUMO

A indústria mineradora tem uma forte influência na economia brasileira, no entanto, para acessar as reservas de minério é necessário realizar a remoção da cobertura vegetal e camada superficial do solo resultando em múltiplos danos ambientais. Portanto, programas de recuperação de áreas degradadas tornam-se essenciais a fim de mitigar ou compensar os impactos negativos. Estudos realizados em áreas mineradas em recuperação em ecossistemas brasileiros demonstram que a avaliação das propriedades físicas e químicas associadas à atividade biológica são fundamentais no entendimento da real condição do solo, e deve levar em consideração que o ambiente é dinâmico e complexo com características diversificadas. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi desenvolver e testar uma nova abordagem para avaliação da agregação do solo e quantificação do teor de glomalina, como indicador de qualidade do solo em recuperação na Amazônia Brasileira. Nesse contexto, avaliaram-se seis minas desativadas em diferentes estágios de revegetação, sendo uma em condição recém-minerada, três em processo intermediário, duas em processo avançado e a florestal natural. Para esses tratamentos, os resultados obtidos apresentaram uma correlação positiva entre textura argilosa, diâmetro médio geométrico, circularidade, diâmetro de Feret dos agregados do solo e teor de glomalina (facilmente extraível e total), permitindo identificar diferentes níveis de resposta ambiental e grau de desenvolvimento nessas áreas mineradas em recuperação. A proteína do solo relacionada à glomalina aumentou nas áreas com estágios mais avançados de recuperação, mostrando-se, sensíveis às mudanças ambientais do solo. As características morfométricas possibilitaram analisar a qualidade do solo em relação à agregação, além de explicar melhorias na estabilidade estrutural. A caracterização da variabilidade morfométrica dos agregados mostrou-se como potencial ferramenta de gestão ambiental, visando à melhoria da condição da agregação em solos degradados. Desta forma, é possível confirmar a aplicabilidade dos indicadores em relação à qualidade da agregação de solo minerado em processo de recuperação, pois essa abordagem metodológica integra um conjunto de indicadores quantitativos e qualitativos que fornecem uma síntese das condições ambientais bióticas e abióticas, contribuindo para o entendimento da situação real e as possibilidades de ações mitigadoras dos impactos no solo degradado. Considerando que nas florestas tropicais brasileiras concentra-se uma das maiores reservas minerais do mundo e a escassez de pesquisas relacionadas a esse assunto, a presente pesquisa busca avançar em um campo pouco explorado pela comunidade científica, tanto nacional como internacional, apresentando o estudo da agregação por meio da relação entre morfometria e a glomalina como potencial indicador da condição do solo para avaliar e monitorar áreas degradadas.

**Palavras-chave:** Indicadores Ambientais; Qualidade Solo; Mineração; Restauração Ecológica; Amazônia.

CARVALHO, M. M. **Soil evaluation of recovering mined areas within the Amazon biome through the relationship between soil aggregate morphometry and glomalin.** 2021. 108f. Thesis (PhD in Environmental Sciences) - Institute of Science and Technology of Sorocaba, UNESP - Paulista State University, Sorocaba, 2021.

---

### Abstract

The mining industry has a strong influence on the Brazilian economy, however, to access the ore reserves it is necessary to remove the vegetation cover and topsoil resulting in multiple environmental damages. Therefore, programs to recover degraded areas are essential in order to mitigate or compensate for negative impacts. Studies carried out in recovered mined areas in Brazilian ecosystems demonstrate that the assessment of physical and chemical properties associated with biological activity are fundamental in understanding the real condition of the soil, and must take into account that the environment is dynamic and complex with diverse characteristics. Thus, the objective of this work was to develop and test a new approach for assessing soil aggregation and quantifying glomalin content, as an indicator of soil quality in recovery in the Brazilian Amazon. In this context, six deactivated mines at different stages of revegetation were evaluated, one in newly mined condition, three in an intermediate process, two in an advanced process and the natural forest. For these treatments, the results obtained showed a positive correlation between clay texture, geometric mean diameter, circularity, Feret diameter of soil aggregates and glomalin content (easily extractable and total), allowing to identify different levels of environmental response and degree of development in these recovered mined areas. Soil protein related to glomalin increased in areas with more advanced stages of recovery, proving to be sensitive to environmental changes in the soil. The morphometric characteristics made it possible to analyze the soil quality in relation to aggregation, in addition to explaining improvements in structural stability. The characterization of the morphometric variability of the aggregates proved to be a potential environmental management tool, aiming at improving the condition of aggregation in degraded soils. In this way, it is possible to confirm the applicability of the indicators in relation to the quality of the aggregation of mined soil in the recovery process, as this methodological approach integrates a set of quantitative and qualitative indicators that provide a synthesis of the biotic and abiotic environmental conditions, contributing to the understanding of the real situation and the possibilities of actions to mitigate impacts on degraded soil. Considering that one of the largest mineral reserves in the world is concentrated in the Brazilian tropical forests and the scarcity of research related to this subject, the present research seeks to advance in a field little explored by the scientific community, both nationally and internationally, presenting the study of aggregation through the relationship between morphometry and glomalin as a potential indicator of soil condition to assess and monitor degraded areas.

**Keywords:** Environmental indicators; Soil quality; Ecological Restoration; Mining; Amazon.

## LISTA DE FIGURAS

### Conteúdo

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Organograma de apresentação dos Capítulos da Tese.....                   | 16 |
| Figura 2 - Pirâmide da formação dos indicadores e da condensação da informação..... | 26 |
| Figura 3 - Diagrama triangular para análise textural.....                           | 34 |
| Figura 4 - Localização da Área de estudo.....                                       | 37 |
| Figura 5 - Imagem do agregado bruta e imagem processada.....                        | 41 |
| Figura 6 - Imagem da Curva do coeficiente de assimetria.....                        | 63 |
| Figura 7 - Histograma de frequência da relação.....                                 | 64 |
| Figura 8 - Carta de variabilidade ao acaso.....                                     | 66 |
| Figura 9 - Carta de dados hierarquizados.....                                       | 67 |
| Figura 10 - Padrão gráfico para qualificação do equilíbrio.....                     | 69 |
| Figura 11 - Análise de Tendência na Dispersão.....                                  | 69 |
| Figura 12 - Estrutura das Hifas e Fungos.....                                       | 74 |
| Figura 13 - Contribuição das variáveis na PCA.....                                  | 89 |
| Figura 14 - Análise de Componente Principal (Dim 2/ Dim 1).....                     | 91 |
| Figura 15 - Análise de Componente Principal (Dim 4/ Dim 1).....                     | 93 |
| Figura 16 - Análise de Componente Principal (Dim 4/ Dim 2).....                     | 94 |

## LISTA DE EQUAÇÃO

### Conteúdo

|  |    |
|--|----|
| Equação 1 – Diâmetro Médio Geométrico (DMG)..... | 41 |
| Equação 2 – Arredondamento do agregado (Ar)..... | 42 |
| Equação 3 – Circularidade do agregado (Cir)..... | 42 |
| Equação 4 – Diâmetro de Feret (DF).....          | 43 |
| Equação 5 – Max/Min Feret (Max/Min).....         | 43 |
| Equação 6 – Densidade Total (DT).....            | 43 |
| Equação 7 – Média Aritmética ( $\bar{X}$ ).....  | 44 |
| Equação 8 – Desvio Padrão (S).....               | 44 |
| Equação 9 – Coeficiente de Variação (CV).....    | 44 |
| Equação 10 – Box Cox (Y).....                    | 45 |

## LISTA DE TABELAS

### Conteúdo

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Descrição geral da área de estudo .....   | 38 |
| Tabela 2 - Representatividade do coeficiente de variação .....                                   | 44 |
| Tabela 3 - Valores médios determinados de DMG (mm) para todas as minas.....                      | 46 |
| Tabela 4 - Dados da Vegetação das áreas minerada (2015-2019).....                                | 47 |
| Tabela 5 - Valores médios determinados para a área dos agregados nas 5 peneiras .....            | 48 |
| Tabela 6 - Valores médios determinados de arredodamento (mm) dos agregados .....                 | 50 |
| Tabela 7 - Valores médios determinados para circularidade dos agregados .....                    | 51 |
| Tabela 8 - Valores médios determinados para diâmetro de Feret dos agregados .....                | 52 |
| Tabela 9 - Densidade Total dos diferentes estágios de recuperação do solo .....                  | 53 |
| Tabela 10 - MANOVA entre as Minas e os valores médios das variáveis morfométricas. ....          | 54 |
| Tabela 11 - MANOVA entre os substratos e os valores médios das variáveis morfométricas. ....     | 55 |
| Tabela 12 - MANOVA entre as peneiras e os valores médios das variáveis morfométricas.....        | 56 |
| Tabela 13 – Análise estatística descritiva do Max/Min di diâmetro de Feret.....                  | 62 |
| Tabela 14 - Descrição geral da área de estudo .....  | 77 |
| Tabela 15 - Valores médios determinados para Glomalina Facilmente Extraível (GFE).....           | 79 |
| Tabela 16 - Valores médios determinados para Glomalina Total (GT) .....                          | 80 |
| Tabela 17 - ANOVA para avaliar as diferenças da idade em relação GFE e GT .....                  | 82 |
| Tabela 18 - ANOVA para avaliar as diferenças entre diâmetros em relação GFE e GT.....            | 83 |
| Tabela 19 - ANOVA para avaliar as diferenças entre Substrato e Textura em relação GFE e GT ..... | 84 |
| Tabela 20 - Matriz correlação Pearson entre GFE/GT e parâmetros morfométricos .....              | 86 |

## SUMÁRIO

### Conteúdo

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 13 |
| 1.1. Estrutura de desenvolvimento .....   | 16 |
| 1.2. HIPÓTESES.....   | 18 |
| 1.3. OBJETIVOS.....   | 18 |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | 20 |
| 2.1. Mineração no Brasil no Brasil.....   | 20 |
| 2.2. Recuperação de Áreas degradadas pela mineração .....                         | 22 |
| 2.3. Indicadores Ambientais .....   | 26 |
| 2.3.1 Indicadores da Qualidade do solo.....                                       | 27 |
| 2.4. Área de estudo: Mineração na Floresta Nacional do Jamari .....               | 30 |
| <b>3. Análise física do solo através da morfometria dos agregados</b> .....       | 33 |
| 3.1. Introdução.....  | 33 |
| 3.2. Metodologia.....   | 37 |
| 3.3. Resultados.....  | 46 |
| 3.4. Conclusão.....   | 57 |
| <b>4. Análise de variabilidade dos agregados de solo minerado</b> .....           | 58 |
| 4.1. Introdução.....  | 58 |
| 4.2. Metodologia.....   | 60 |
| 4.3. Resultados.....  | 62 |
| 4.4. Conclusão.....   | 71 |
| <b>5. Análise microbiológica do solo através quantificação de glomalina</b> ..... | 72 |
| 5.1. Introdução.....  | 72 |
| 5.2. Metodologia.....   | 77 |
| 5.3. Resultados.....  | 79 |
| 5.4. Conclusão.....   | 95 |
| <b>6. Considerações Finais</b> .....  | 96 |
| <b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | 97 |

## 1. INTRODUÇÃO

Os programas de recuperação de áreas degradadas surgiram como um componente fundamental e necessário no desenvolvimento do setor minerário no Brasil, devido a necessidade de mitigação ou compensação dos impactos negativos e danos ambientais da atividade (LEINFELDER, et al., 2015; MMA, 2015). Esse processo envolve uma dinâmica complexa, de longo prazo, pelo qual se busca o retorno da condição produtiva das terras altamente degradadas (LEI et al., 2016, LEINFELDER, et al., 2015; KAVAMURA; ESPOSITO, 2010).

São inúmeras as estratégias empregadas, porém, quando ecossistemas sensíveis de grande relevância são ocupados por atividades minerárias, é necessário realizar a restauração dos processos ecológicos possibilitando o retorno a uma condição aproximada da original (STANTURF et al., 2014; WANG et al., 2011; MUKHOPADHYAY et al., 2016, 2014; LI et al., 2006; WEINSTEIN et al., 2014).

No Estado de São Paulo, as pesquisas relacionadas à restauração ecológica vêm promovendo significativo desenvolvimento de conhecimento no tema (GANDOLFI, 2017; ARONSON et al. 2011). Porém, há um maior direcionamento para avaliação da condição ambiental baseada nas comunidades vegetais reconstituídas sob os locais degradados. Embora essa abordagem seja válida para condições de alteração reduzida do solo, pesquisas realizadas em ambientes minerados da Amazônia Brasileira demonstraram que para solos muito alterados, mesmo com adoção de técnicas de recuperação, devido à influência significativa das propriedades físico-químicas e microbiológicas dos substratos degradados na resposta das florestas plantadas, precisam de longos períodos de monitoramento para análise dos resultados, além da avaliação de diversas variáveis para análise da aptidão dos solos em recuperação (LONGO et al., 2011; RIBEIRO et al., 2016; YADA et al., 2016; FENGLER et al., 2017).

Como resultado, há maior demanda por recursos, além da necessidade de estabelecimento de indicadores adequados para monitoramento do processo de recuperação ambiental de solos minerados. Algumas iniciativas têm buscado sanar as deficiências constatadas (MUKHOPADHYAY et al., 2013, 2014, 2016), porém, um aspecto crucial ainda é pouco explorado, o processo de agregação do solo.

A agregação do solo é considerada como um fator condicionador da qualidade estrutural, por influenciar cinco elementos que qualificam a camada superficial do solo: aeração, armazenamento de água, permeabilidade, resistência à erosão e suporte para a biodiversidade (CALONEGO; ROSOLEM, 2008; LOSS et al., 2011; RABOT et al. 2018). Além disso, as propriedades estruturais dos agregados podem afetar diretamente diversas propriedades físicas e químicas do solo, como os gradientes nas concentrações de oxigênio do ar do solo (SEXSTONE et al., 1985), além de gradientes em composições de matéria orgânica (ELLERBROCK; GERKE, 2004; URBANEK et al., 2007).

Considerando que os futuros desafios da restauração ecológica pautam pela necessidade de métodos compreensivos, sistêmicos e expeditos para avaliação da efetividade das ações de recuperação ambiental, a avaliação da condição da agregação dos solos submetidos ao processo de recuperação ambiental pode representar um fator chave. Estudos recentes têm demonstrado que apenas a estabilidade de agregados não é suficiente para averiguação de propriedades ecossistêmicas do solo, uma vez que fatores como a composição textural e mineralógica do solo, podem afetar diretamente o nível de coesão de agregados (WANG et al., 2016).

Nesse sentido, a análise visual individualizada de agregados tem se mostrado como uma abordagem promissora, com a busca pela verificação do grau de desenvolvimento da agregação do solo, por meio da observação de fatores de convergência de efeitos da atividade biológica diversificada com fatores físicos (PECHE FILHO, 2018).

Em geral, o estudo da forma de agregados e rede de poros de imagens 2D ou 3D têm sido empregado. Porém, ainda são necessários mais estudos relacionados à sensibilidade de parâmetros morfométricos na descrição da morfologia de partículas, qualificação da agregação e inferência quanto ao grau de desenvolvimento da agregação e qualidade dos solos (MUNKHOLM et al., 2016).

Por outro lado, na restauração, estudos realizados em áreas mineradas em recuperação na Amazônia brasileira, têm demonstrado a importante relação entre as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo com o grau de

desenvolvimento florestal e na avaliação da qualidade fitossociológica, em relação ao ambiente de referência natural (LONGO et al, 2011; RIBEIRO et al, 2016; YADA et al, 2016, FENGLER, 2018).

Segundo Luna et al., (2016) há forte relação entre a agregação e atividade biológica, sendo, a presença de macroagregados atribuída a matéria orgânica, que age como substrato para o desenvolvimento da comunidade microbiológica no solo. Desta forma, a presença de uma elevada carga microbiana realiza a transição de microagregados, compostos basicamente por partículas minerais, para macroagregados, que aglomeram as partículas minerais com proteínas, enzimas, material orgânico e microorganismos, sendo também parcialmente responsável pela estabilidade dos agregados (TROEH; THOMPSON; 2007; TRUBER, 2014).

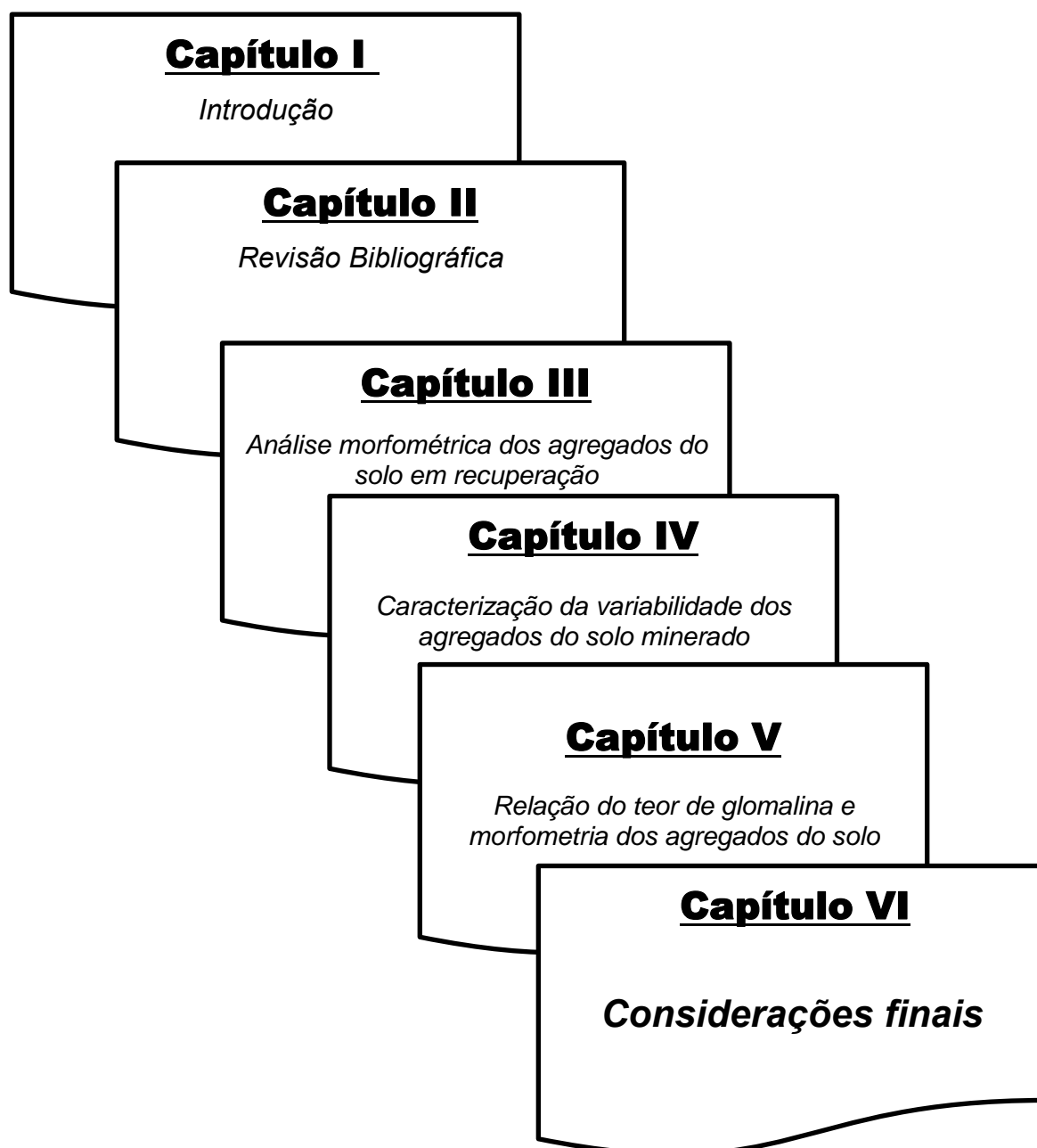
A glomalina foi proposta para melhorar a estabilidade do solo evitando a desagregação por água, pois relação significativa entre a concentração de glomalina e a quantidade de agregados estáveis em água foi demonstrada (BRADFORD, 1976; WRIGHT; UPADHYAYA, 1998, RILLIG et al. 2001; RILLIG, 2004; GISPERT et al., 2013). Sua produção ocorre da interação entre o solo e o sistema vegetal, mediante a ação de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que são responsáveis por auxiliar no desenvolvimento das plantas, fornecendo água e nutrientes, muitas vezes ocupando profundidades não alcançadas pelas raízes (SMITH; READ, 2008, BEDINI, 2007).

Nesse contexto, a presente proposta busca desenvolver e testar uma abordagem para qualificação da agregação de ambientes em recuperação ambiental, por meio de um estudo de caso de áreas degradadas pela mineração localizadas na Amazônia Brasileira. No desenvolvimento da proposta buscou se averiguar a qualidade do solo, por meio da análise morfométrica dos agregados. Em seguida, foi realizada análise de variabilidade da forma dos agregados do solo, finalizando com a avaliação da relação da morfometria dos agregados e a quantificação do teor de glomalina do solo. Contextualizando, verificou-se a aplicabilidade dos indicadores estudados em relação aos diferentes estágios de revegetação das minas desativadas em recuperação.

## 1.1. Estrutura de desenvolvimento dos capítulos

O documento foi organizado em seis Capítulos (Figura 1). O primeiro inicia com uma introdução geral sobre o assunto desenvolvido e em seguida são apresentadas as hipóteses e objetivos da pesquisa.

Figura 1 - Organograma de apresentação dos Capítulos da Tese.



No segundo capítulo foi apresentada a base conceitual, buscando o posicionamento do estudo frente à linha de pesquisa, no contexto da recuperação de áreas degradadas pela mineração no Brasil e uma breve revisão sobre indicadores de qualidade de solo: agregação e glomalina.

No terceiro capítulo foi realizada a análise física da estrutura do solo por meio morfometria dos agregados em áreas de diferentes níveis de recuperação (revegetação) e comparada com o ecossistema de referência (floresta natural). No quarto capítulo foi realizada caracterização de variabilidade da forma dos agregados do solo minerado e estudada a aplicação da análise como instrumento de avaliar a qualidade de agregação.

No quinto capítulo foi apresentada a análise microbiológica por meio da quantificação do teor de glomalina e sua relação com conjunto de dados físicos da análise morfométrica, além do detalhamento sobre a proposta metodológica empregada. Assim, no sexto e último capítulo foi descrito as considerações finais obtidas sobre aplicabilidade dos indicadores apresentados por meio da integração dos dados de agregação do solo propostos avaliando diferentes estágios de recuperação, tendo como fechamento textual as Referências bibliográficas.

## **1.2.HIPÓTESE**

A relação entre a morfometria dos agregados e a quantificação do teor da glomalina na avaliação do processo de agregação do solo em áreas com diferentes estágios de recuperação pode identificar diferentes níveis de resposta ambiental e grau de desenvolvimento em áreas mineradas em recuperação, permitindo a utilização desses parâmetros como indicador de qualidade ambiental do solo para avaliar e monitorar áreas degradadas em recuperação.

## 1.3.OBJETIVOS

### 1.3.2 GERAL

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e testar uma abordagem para monitoramento do processo de recuperação de áreas degradadas, utilizando a relação entre as variáveis morfométricas dos agregados e o teor de glomalina como componente metodológico para avaliar o estado de agregação do solo das áreas mineradas na Floresta Nacional do Jamari-RO.

### 1.3.2 ESPECÍFICOS

- Analisar a morfometria dos agregados do solo, por meio dos parâmetros: DMG, Arredondamento, Circularidade, Área, Diâmetro de Feret e Densidade do solo;
- Qualificar a agregação do solo em diferentes áreas mineradas em recuperação e o ecossistema de referência amazônico;
- Utilizar a caracterização da variabilidade da forma dos agregados para avaliar a condição de agregação;
- Quantificar os teores de glomalina facilmente extraível (GFE) e glomalina total (GT) dos agregados;
- Avaliar a contribuição de macro e microagregados no acúmulo de glomalina no solo e sua variação ao longo dos estágios de desenvolvimento florestal.
- Avaliar a qualidade dos solos em recuperação (revegetação) no seu estado atual comparando-o com o solo em estado natural (ecossistema de referência).
- Utilizar a metodologia que tem como parâmetro a morfometria de agregado e o teor de glomalina (GFE e GT) como indicador de recuperação do solo em áreas mineradas.
- Avaliar a representatividade do método proposto como indicador de qualidade da agregação do solo no monitoramento de áreas degradadas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**

### **2.1. Mineração no Brasil**

Desde o final do século XX, com a expansão da globalização e o aumento do consumo de metais, os conflitos territoriais relacionados à mega-mineração a céu aberto no continente latino-americano intensificaram, levando à indústria mineral ao crescimento a ritmo acelerado, atraindo a atenção de companhias do mundo todo para investimentos no setor mineral (ARAÚJO; FERNANDES, 2016).

De acordo com o Instituto Brasileiro de mineração – IBRAM (2014), a mineração é um dos pilares da sustentação econômica mundial, que traz diversos benefícios econômicos e sociais ao país. Neste cenário, o Brasil é considerado um “player global” muito importante do setor. A abundância de recursos naturais faz com que o Brasil se destaque por possuir uma das maiores produções/exportação mineral do mundo, produzindo anualmente mais de 2 bilhões de toneladas de bens minerais. Além de ser pioneiro na produção da liga de ferronióbio e terceiro maior produtor de minério de ferro, grafita bauxita e caulim.

Nos últimos 10 anos, o valor da produção da indústria extrativa mineral (mineração e lavra garimpeira) cresceu 550%, à custa de significativas ampliações produtivas (IBRAM, 2014). Segundo dados do IBGE em 2017, o segmento da indústria extrativa, ao qual a mineração está inserida, movimentou mais de R\$ 100 bilhões em valores correntes, representa 4% do PIB brasileiro, que foi de R\$ 6,8 trilhões. No mesmo ano o saldo superavitário da balança comercial brasileira registrou novo recorde, totalizando US\$ 66,989 bilhões com as exportações (expansão de 40,5% em relação ao ano anterior), já as importações contabilizaram US\$ 150,749 bilhões, registrando crescimento de 9,5%. Somente o minério de ferro, exportado principalmente para a China corresponde a 60% das vendas externas (MMA, 2017).

Os números mostram o crescimento e avanço da atividade mineradora, e de acordo com os dados do IBRAM é esperado crescimento promissor do mercado nos próximos anos, pois os investimentos estimados de 2015 a 2019 totalizam 48 milhões de euros, e a grande maioria foi feita por empresas multinacionais (IBRAM, 2014; ARAÚJO; FERNANDES, 2016; MMA, 2017).

A indústria mineral demonstra em números sua contribuição para o desenvolvimento econômico do país, preconizado pelas políticas públicas brasileiras. Uma das contribuições da mineração para o desenvolvimento brasileiro, por exemplo, é a de ser o elo articulador de setores-chave da nossa economia como siderurgia e metalurgia, que têm a capacidade de potencializar ciclos de expansão de maior grandiosidade para a geração de renda, de emprego, de tributos e de excedentes exportáveis no país. Somente o setor de “minérios e seus concentrados” estão contribuindo diretamente com mais de 20 bilhões de dólares para a formação do superávit comercial do país, isto somente no ano de 2017.

Entretanto, é preciso ressaltar que a atividade de mineração traz inúmeros impactos negativos ao meio ambiente. Segundo Barros (2017), uma pesquisa realizada em 2014 utilizando 105 estudos de casos sobre conflitos envolvendo mineradoras no Brasil, destaca que “a forte carga impactante da indústria extrativa mineral se caracteriza por ser diariamente exercida, de forma descentralizada, pelas mais de 3 mil minas e mais de 9 mil mineradoras hoje em atividade no país”. Conforme dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), existem apenas 8.800 empresas mineradoras legalizadas no país e muitas outras ilegais.

Os danos ambientais e sociais da mineração são evidenciados em todas as fases de exploração do minério (lavra, transporte e beneficiamento do minério), pois, para acessar as reservas minerais no subsolo é necessário fazer a remoção das camadas de solo superficiais e cobertura vegetal, acarretando em significativas modificações ambientais, conseqüentemente a destruição total dos sistemas naturais, tornando o restabelecimento de florestas complexas um grande desafio. Principalmente quando estão localizadas em Biomas tropicais sensíveis, como no Amazônico, Cerrado e Mata Atlântica. Mesmo com o domínio de soluções técnicas para a recuperação ambiental a reversão dos danos causados é extremamente difícil e sem garantia de retorno dos níveis de qualidade ambiental existente antes da degradação (ARAÚJO, 2008; FENGLER, 2018).

Por isso, diante da intensificação da mineração e da magnitude da alteração da paisagem decorrentes da atividade de jazidas localizadas em regiões com biomas de extrema sensibilidade e alto valor ecossistêmico, foram desenvolvidos concomitantemente ao desenvolvimento social e econômico, políticas para o

controle dos impactos negativos da mineração sob o meio ambiente. Deste modo, programas de recuperação de áreas degradadas passam a atuar com objetivo de minimizar ou mitigar os impactos causados pela mineração desde a década de 70 (IBAMA, 2016; LEINFELDER, et al. 2015, GANDOFI, 2017).

No entanto, a falta de organização do governo municipal para lidar com os impactos da mineração torna esse controle pouco eficaz diante dos impactos causados. Assim a questão ambiental tomou proporções alarmantes pela degradação da paisagem, poluição de toda ordem, decorrente do modelo de desenvolvimento baseado na atividade extrativa mineral. Ações mais concretas demoraram a ser realizadas, se fortalecendo após a aprovação da Resolução CONAMA 01/1986 (MMA, 1986).

Neste momento, a atividade mineradora começa a passar por intenso controle regulatório por parte do Estado e da sociedade, em suas diversas etapas. Pois, qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, afetando a biota, as condições estéticas e a qualidade dos recursos ambientais deve ser considerado impacto ambiental (Resolução 1/1986 CONAMA). Tornando a recuperação das áreas degradadas pela mineração um componente fundamental para a reversão dos impactos ambientais e proteção dos ecossistemas brasileiros locais, sendo atualmente um requisito para mineração no país.

## **2.2. Recuperação de Áreas degradadas pela mineração**

### **2.2.1 Área degradada**

O conceito de área degradada ou de paisagens degradadas pode ser compreendido como, locais onde existem ou existiram processos causadores de danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como a qualidade produtiva dos recursos naturais (DECRETO FEDERAL 97.632/89).

Segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (2011), pode ser também considerado uma área impossibilitada de retornar por uma trajetória natural, a um ecossistema que se assemelhe a um estado conhecido antes, ou para outro estado que poderia ser esperado, conforme Instrução Normativa nº04/2011 do IBAMA.

Atualmente mais de 15% dos solos do mundo encontram-se degradados ou em processo de degradação. Na região tropical, a situação é ainda pior: mais da metade dos solos tropicais possuem algum grau de degradação. Das áreas degradadas, 98,8% estão relacionadas às atividades de produção e extrativismo, construção de estradas, represas, áreas industriais, resultando em impacto imediato sobre o solo (EMBRAPA, 2004; KOHLRAUSCH; JUNG, 2015).

O Brasil, desde seu descobrimento, sofreu um processo de desbravamento extrativista e o conceito de progresso e desenvolvimento significou, durante séculos, explorar ao máximo a flora e a fauna, degradando o ecossistema comprometendo o retorno ao estado anterior, por ser bastante lento ou em alguns casos não ocorrer. Nesse cenário, a interferência especializada é necessária para a recuperação adequada do ecossistema (MOHR et al. 2012; KOHLRAUSCH; JUNG, 2015).

### **2.2.2 Recuperação de Área degradada**

A recuperação de áreas degradadas está fortemente ligada à ciência da restauração ecológica, definida como o processo que auxilia o restabelecimento de um ecossistema degradado, danificado ou destruído. Um ecossistema é considerado recuperado/restaurado quando contém recursos bióticos e abióticos suficientes para continuar seu desenvolvimento sem auxílio ou subsídios adicionais (MMA, 2015).

A Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, distingue, para seus fins, um ecossistema “recuperado” de um “restaurado”, da seguinte forma no art. 2º:

§ 8º - Recuperação: restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original;

§ 9º - Restauração: restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original;

O conceito de recuperação ou restauração de áreas degradadas é bastante discutido, no entanto, considerando a recuperação de solos degradados por mineração, três abordagens podem ser definidas: [1] Restauração: retorno do meio à

sua condição original; [2] Reabilitação: retorno parcial às condições originais; [3] Recuperação: retorno das condições ecossistêmicas do solo para uma nova condição, com estrutura e funções diferenciadas da condição natural, em situações onde ocorreu alteração no solo, assim como na mineração (BRADSHAW, 1997; FENGLER, 2018).

De acordo com Stanturf et al. (2014), na restauração florestal os principais desdobramentos são: [1] Reabilitação: recomposição da estrutura, e dos processos ecológicos, da diversidade de espécies; [2] Reconstrução: recomposição de espécies nativas e locais com outras formas de uso e ocupação da terra; [3] Recuperação: restauração de locais sujeitos a severas alterações ambientais, como áreas degradadas pela mineração, geralmente sem cobertura vegetal.

Para Lima et al. (2016), o programa de recuperação de terras tem como componente principal: [1] Restauração: processo que busca o retorno ao estado original; [2] Remediação: descontaminação do meio, sem oferecer risco a saúde humana; [3] Recuperação: busca a restauração sistêmica do meio, concluindo quando o meio degradado for substituído por outro com melhores funções ecológicas; [4] Reabilitação: manutenção da qualidade ambiental aperfeiçoando a capacidade de gestão territorial, incluindo uso alternativo da área.

Leifelder et al. (2015), após revisão na literatura nacional e internacional das definições e conceitos, propõe uma definição mais específica considerando as modificações ambientais decorrentes da atividade mineradora. Segundo os autores, recuperação de áreas degradadas após o fim das atividades de mineração é a recuperação da capacidade produtiva do solo, com objetivo de possibilitar um novo uso sustentável da área (FENGLER, 2018). Apesar do desenvolvimento de novas técnicas de recuperação ao longo do tempo, sua terminologia, seus objetivos e resultados obtidos ainda geram discussões e apresentam divergências na comunidade científica, que têm se desdobrado em novos conceitos, dependendo do caso em estudo (ARONSON et al., 2011).

Diante da falta de consenso em relação à definição da palavra, é importante ressaltar um dos princípios do Direito Ambiental, que é a responsabilização dos causadores de danos ambientais, chamado de princípio da recuperação da

qualidade ambiental, ou da recuperação da área degradada (ARONSON et al., 2011). Esse princípio encontra-se expresso na Constituição da República Federativa do Brasil e na Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, que essa Política tem como objetivo a preservação, melhoria e a recuperação da qualidade ambiental, atendidos alguns princípios, dentre eles o da recuperação de áreas degradadas, previsto no Art. 2o da Lei 6938/81:

§ 2º Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.

§ 3º As condutas e atividades consideradas lesivas ao meio ambiente sujeitarão os infratores, pessoas físicas ou jurídicas, a sanções penais e administrativas, independentemente da obrigação de reparar os danos causados [...] Para efeito deste decreto são considerados como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem as suas propriedades, tais como a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais.

Desta forma, a responsabilidade dos que exploram a mineração não se esgota na recuperação do meio ambiente natural degradado, mas também em relação aos impactos à vida em todas as suas formas, o que levará ao controle do meio ambiente cultural, social e do trabalho na forma da lei (MMA, 2015).

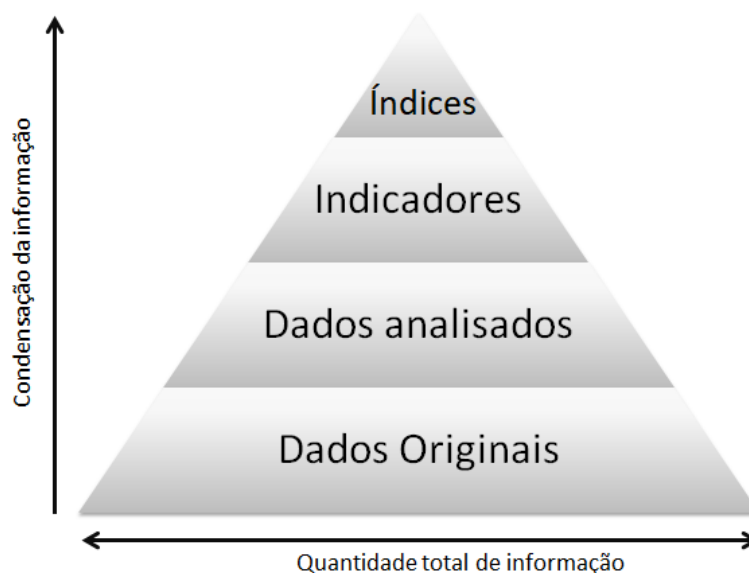
Segundo Fengler (2018), para recuperação efetiva de uma área degradada por mineração três abordagens devem ser fortemente adotadas como ferramentas de precisão: [1] Condição limitante: determinar um padrão mínimo de qualidade, com base nas expectativas no processo de recuperação do local com condições mais adversas, ou insatisfatórias; [2] Índices específicos: avaliar a aptidão da área em recuperação através de índices que integram vários indicadores significativos ao ecossistema; [3] Método *extenics*: encontrar novas soluções de problemas de natureza qualitativa e quantitativa utilizando ferramentas e métodos estatísticos.

### 2.3. Indicadores Ambientais

Indicadores são parâmetros que tem a capacidade de descrever um estado ou uma resposta dos fenômenos que ocorrem no meio (SANTOS, 2004). Um indicador ambiental é um parâmetro qualitativo ou quantitativo, mensurado no tempo e no espaço que apresenta informações sintéticas sobre os fatos, processos e tendências complexas observáveis e mensuráveis. A estrutura de classificação dos indicadores busca a simplicidade de uso, por isso deve ter facilidade de aplicação e repetição, com bases conceituais bem estabelecidas (PNIA, 2014, COSTA, 2015).

Os indicadores são essenciais para a tomada de decisão, pois permitem projetar cenários sobre o estado do meio e acompanhar os resultados de uma decisão por meio do monitoramento (SANTOS, 2004; MACHADO et al., 2011). A sintetização da informação ocorre por meio da análise contextualizada e estatística dos registros originais. De forma que as variáveis selecionadas possuam correlação clara com as demais, de forma que o indicador constitui uma representação simplificada da realidade ambiental complexa (Figura 2) (COSTA, 2015).

Figura 2 - Pirâmide da formação dos indicadores e da condensação da informação.



Fonte: PNIA (2014).

O Painel Nacional de Indicadores Ambientais – PNIA elaborado em 2012 no Brasil estabelece questões para a gestão de uma informação ambiental objetiva e de

qualidade. Os indicadores possuem três funções essenciais: função científica para avaliar o estado da ambiência, a função política que visa contribuir para identificar prioridades e gerar políticas públicas, permitindo a utilização de recursos públicos de forma efetiva e a função social para facilitar a comunicação e incentivar responsabilidade ambiental (PNIA, 2014).

Os indicadores são empregados para avaliar e comparar territórios de diferentes dimensões e de diversas complexidades, sendo úteis para prognosticar futuros cenários e nortear ações preventivas. O desenvolvimento de ferramentas de acesso à informação, a integração de banco de dados em sistemas de informação de forma associada e descentralizada e o fortalecimento do processo de sistematização e análise de estatística de indicadores ambientais e de desenvolvimento sustentável são tópicos de extrema importância para o desenvolvimento das sociedades que visam à globalização de informações (MANCINELLI et al., 2015; PNIA, 2014).

### **2.3.1 Indicadores da Qualidade do solo**

O termo qualidade do solo se tornou mais usual a partir de 1990, após a publicação do relatório intitulado “Soil and water quality – an agenda for agriculture”, ressaltando que a qualidade do solo é tão importante quanto à qualidade do ar e da água na determinação da qualidade global do ambiente em que vivemos (NATURAL RESEARCH COUNCIL -NRCC, 1993). Conforme esse relatório, a qualidade do solo foi concebida em razão de seu papel em ecossistemas naturais, uma vez que a qualidade deste recurso natural, historicamente, sempre esteve relacionada à sua produtividade.

Atualmente a maioria dos conceitos propostos se baseia na qualidade do solo como a capacidade deste funcionar dentro dos limites do ecossistema e interagir positivamente com o meio. A Sociedade Americana de Ciência do Solo conceitua a qualidade do solo como a capacidade de um solo funcionar, dentro de um sistema natural ou manejado mantendo a produtividade e sem interferir na qualidade da água, do ar e dos seres vivos (DORAN; PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1997).

Desta forma, a avaliação quantitativa da qualidade do solo é fundamental na determinação da sustentabilidade ecossistêmica, no entanto, definir e quantificar a qualidade do solo não é tão simples em decorrência da complexidade dos fatores envolvidos. Sua característica abstrata depende de seus atributos intrínsecos, de fatores externos, como as práticas de uso e manejo, de interações com o ecossistema e das prioridades socioeconômicas e políticas. Por isso, a avaliação não deve ser feita de forma reducionista e sim holística, pois a qualidade do solo depende das prioridades previamente estabelecidas, levando em consideração a sua múltipla funcionalidade sem comprometer o desempenho dos serviços ecossistêmicos (EMBRAPA, 2004).

Neste sentido, o estabelecimento de indicadores de degradação ambiental e de sustentabilidade do solo se tornou de suma importância para gestores ambientais, simplificando uma realidade do ecossistema, proporcionando informações para avaliação e monitoramento da qualidade do solo, contribuindo no planejamento e tomada de decisão (CARVALHO et al., 2019).

O uso de indicadores do solo reflete a transformação da superfície terrestre, identificando as relações entre a forma do terreno e os processos naturais que ocorrem, auxiliando no monitoramento dos resultados e inferindo nas mudanças graduais observadas nos comportamentos socioambientais (MACHADO et al. 2011; PNIA, 2014; SANTOS, 2004). Por isso, a determinação de indicadores de qualidade de solo permite a identificação de áreas problemáticas utilizadas na produção e a realização de estimativas realistas de produtividade, além de monitorar mudanças na qualidade ambiental e auxiliar a formulação de políticas de uso da terra.

A identificação de indicadores apropriados para avaliar a qualidade do solo, depende da habilidade de agregar os componentes múltiplos que determinam a sua capacidade em desempenhar suas funções, como a produtividade e o bem-estar ambiental. No entanto, há dificuldade de seleção do indicador mais apropriado devido à complexidade do sistema ecológico, sendo necessário o uso de um conjunto de indicadores que representem a estrutura, função e composição do sistema ecológico (DALE; BEYELER, 2001), considerando a multiplicidade dos atributos físicos, químicos e biológicos, que controlam a intensidade dos processos biogeoquímicos e suas variações temporais e espaciais.

De um modo geral, os indicadores da qualidade do solo podem ser classificados em três grupos; físicos, químicos e biológicos. Cada indicador dentro deste conjunto tem uma função particular na análise da resolução lógica do problema ambiental, fornecendo uma ferramenta mais completa para esclarecer as condições ambientais (NIEMEIJER, 2002). Estes atributos e processos, em sua maioria, são inter-relacionados. Os indicadores físicos estão relacionados ao arranjo das partículas e do espaço poroso do solo, incluindo densidade, porosidade, textura, compactação, capacidade de armazenagem de água disponível, estabilidade e morfometria dos agregados. Refletem, primariamente, limitações ao crescimento radicular, à emergência das plântulas, à infiltração e ou movimento da água no interior do perfil do solo e à disponibilidade de água às plantas.

As características morfométricas do solo refletem a conformação geomorfológica e podem fornecer importantes indicadores para a compreensão dos recursos naturais, que poderão ser utilizados para a viabilização de um desenvolvimento sustentável (MACHADO et al., 2011; COSTA, 2015).

Entre os indicadores biológicos estão incluídos: a matéria orgânica, a diversidade de espécies, a massa microbiológica, o nível de respiração do solo, o que possibilita avaliar a atividade microbiológica. A proteína do solo relacionada à glomalina, por exemplo, um bioproduto de origem fúngica, com papel importante na formação e estabilidade de agregados do solo, tem sido utilizado como indicador microbiológico da qualidade de solos agrícolas. Enquanto os indicadores visuais podem ser obtidos a partir da interpretação de fotografias e indicam de forma clara se o solo está ameaçado ou passando por alterações.

As condições do solo afetam as relações solo-planta, a qualidade da água, a disponibilidade de nutrientes, mobilidade de nutrientes, além disso, as condições físicas e bioquímicas estão fortemente relacionadas com a qualidade do solo e sua investigação, gera um relatório completo da real condição do solo. Deste modo, os melhores indicadores da qualidade do solo integram os efeitos combinados de diversos atributos ou processo do solo, de forma precisa, simples e significativa, respondendo às mudanças propostas do que é sustentável e não sustentável.

## **2.4. Área de estudo: Mineração na Floresta Nacional do Jamari**

A Amazônia possui a maior faixa de floresta tropical do mundo, com mais de 3,3 milhões de km<sup>2</sup>, uma área superior à somatória de todo o território da França, Itália, Espanha e Portugal. Desde o século 19 diversas discussões políticas ocorreram devido à riqueza de recursos naturais, incluindo fauna e flora extremamente diversificada e reservas minerais abundantes, com jazidas de ferro, manganês, alumínio, cobre, zinco, níquel, cromo, titânio, fosfato, ouro, prata, platina, ródio, estanho, tungstênio, nióbio, zircônio, urânio, e pedras preciosas, como diamantes, rubis e safiras (PEDLOWSKI, 1997; SANTOS, 2002; FENGLER, 2018).

Inevitavelmente, a mineração na Amazônia tem ameaçado o ecossistema local, devido ao processo agressivo de extração e processamento de minerais, além da eliminação dos resíduos de rocha e subprodutos. Diversos Autores alertam sobre os inúmeros impactos negativos e danos ecossistêmicos resultantes, tais como alterações em processos e recursos hídricos, perda de biodiversidade, poluição do solo, ar, água, alterações na topografia e na paisagem, além de mudanças climáticas e outros (PHILIPS, 2016; GONÇALVES et al., 2013; SOUZA et al, 2011; SMITH et al., 1991). Porém, a atividade possui uma série de impactos sócio econômicos positivos que viabilizaram a exploração das jazidas na Amazônia (FENGLER, 2018).

As atividades de exploração se intensificaram após a criação da Rodovia BR-364, nos anos 60, que liga Cuiabá (MT) a Porto Velho, com ocupação das áreas próximas a Floresta do Jamari e, nos anos 70, a mineração de cassiterita se intensificaram devido à viabilidade econômica proporcionada pelas grandes reservas e acesso. À medida que novas minas foram exploradas, um aumento na taxa de ocupação ocorreu especialmente nas faixas laterais da BR-364 (IBAMA, 2005). Como resultado, grandes parcelas de floresta amazônica foram desmatadas, sobretudo pela abertura de novas minas e expansão das terras agrícolas, motivando a criação da Floresta Nacional do Jamari em 1984, a fim de proteger a floresta amazônica remanescente e recuperar as terras degradadas pelo processo de mineração.

Nesse contexto, somente o estado de Rondônia, localizado na porção ocidental da Amazônia brasileira, pelo seu potencial mineral, foi responsável por 90% de todo o estanho brasileiro nos anos 80, com reservas de 4000 toneladas, que vêm sendo exploradas desde então (BEURLEN; CASSEDANNE, 1981). Atualmente, o Brasil ocupa a 5ª posição na produção mundial desse minério, tendo o Estado de Rondônia 47% de todas as reservas em exploração (IBRAM, 2015). A Floresta do Jamari representa uma das regiões onde a mineração de estanho ocorreu e vem ocorrendo.

Com objetivo de reduzir o impacto negativo da mineração e regular a atividade de extração de minério de cassiterita nos domínios da Floresta Nacional do Jamari, foi estabelecido o compromisso entre a empresa de mineração e o IBAMA mediante ao Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (IBAMA, 1999). No acordo foi atribuído ao IBAMA o fornecimento das orientações técnicas necessárias, além da metodologia de revegetação das áreas degradadas. Com cooperação técnica e científica de universidades e centros de pesquisa para avançar na problemática, uma parceria com pesquisadores da Universidade Estadual de São Paulo - UNESP e Universidade de Campinas – UNICAMP foi estabelecida, tendo em vista a reintegração das áreas mineradas à paisagem dominante da região.

Os locais minerados foram subdivididos em parcelas e as ações de recuperação se iniciaram com reconstrução topográfica, terraceamento, ações de correção do solo, adubação orgânica, plantio de leguminosas e plantio de espécies florestais nativas.

Dentro do projeto de recuperação, a revegetação foi desenvolvida em etapas de plantios sendo realizado com intervalo de 2 anos. Foram plantadas em cada mina desativada, aproximadamente, 40.000 mudas de 22 espécies diferentes. Para o plantio das espécies florestais (4x4 metros), foram usadas as seguintes espécies: *Leucena leucocephala* (Leucena); *Inga sp* (Ingá xixica); *Inga edulis* (Ingá de metro); *Anadenanthera macrocarpa* (Angico); *Syzygium jambolanum* (Jambolão); *Vismia sp* (Lacre branco); *Mangifera indica* (Mangueira); *Jacaranda copaia* (Para-pará); *Ochroma pyramidale* (Pau-de-balsa); *Parkia multijuga* (Paricá); *Schizolobium jameireme* (Bandarra); *Tabebuia sp* (Ipê).

De acordo com Fengler (2018), em seu trabalho de caracterização de ambientes em recuperação com base no desenvolvimento fitossociológico, as minas recuperadas na FLONA do Jamari totalizaram 91 espécies plantadas, pertencendo a 37 famílias, sendo 22 espécies exclusivas do processo de regeneração natural (29% do total amostrado). As famílias botânicas com maior número de indivíduos foram a Fabaceae, Myrtaceae e Clusiaceae, apresentando também o maior número de espécies, exceto a família Clusiaceae.

As principais famílias encontradas no processo de regeneração natural foram a Cecropiaceae, Clusiaceae, Cannabaceae, Malvaceae, Melastomataceae, Moraceae, Piperaceae, Siparunaceae, também identificadas nas parcelas localizadas na floresta secundária. No geral, das espécies plantadas, as mais comuns foram a *Inga laurin* e *Syzygium cumini*, ambas com elevada densidade pela larga utilização no processo de revegetação dos locais em recuperação. Nas áreas naturais e provenientes do processo de regeneração natural, as espécies *Bellucia grossularioides*, *Astrocarium aculeatum*, e *Trema micrantha* apresentaram maior quantidade de indivíduos.

Ao longo dos últimos 20 anos, vários estudos foram realizados no local investigando a extensão da degradação promovida pela mineração (RIBEIRO et al, 2006;. LONGO et al., 2005), o desenvolvimento de novas técnicas para recuperação da floresta Amazônia (RIBEIRO et al., 2015;. RIBEIRO et al, 2004), o monitoramento do processo de recuperação (FENGLER et al., 2017; CARVALHO et al., 2019) e a aptidão dos locais em recuperação de terras (YADA, et al., 2015. LONGO et al., 2011).

### **3. ANÁLISE FÍSICA DO SOLO ATRAVÉS DA MORFOMETRIA DOS AGREGADOS**

#### **3.1. Introdução**

Na degradação por mineração, a vegetação e a camada superficial do solo são removidas alterando as propriedades físicas, químicas e biológicas, comprometendo o funcionamento ecossistêmico do solo. Durante o processo de recuperação dessas áreas degradadas, a avaliação e o monitoramento da qualidade do solo são fundamentais, fornecendo subsídios para a escolha de práticas de manejo que permitam a conservação efetiva do ecossistema.

Para o monitoramento da qualidade do solo é necessário avaliar a capacidade do estado atual comparando-o com o solo em estado natural, pois representam condições ecológicas de equilíbrio ambiental, baseados em indicadores ligados a conservação, sensíveis ao manejo e que permita a verificação numa escala de tempo determinado (DORAN; PARKIN, 1994, RIBEIRO et al, 2012; LONGO et al, 2016; FENGLER et al, 2018).

De acordo com Faustino (2018), diversos parâmetros podem ser usados como indicadores de qualidade do solo, no entanto, de todos os indicadores, aqueles ligados à avaliação da qualidade física por meio do estudo de agregados do solo possuem especial importância, pois possibilitam construir conhecimento qualitativo a respeito da estrutura do solo e esta, quando perdida, é difícil de recuperar.

Atualmente a importância da morfometria dos agregados é inquestionável, pois interfere na distribuição do diâmetro dos poros e modifica a dinâmica de ar, água e nutrientes no solo e, conseqüentemente, afeta o crescimento radicular das plantas. Estudos mostram que sistemas de manejos mais agressivos, com intenso revolvimento do solo tendem a fragmentar os agregados reduzindo a rugosidade da superfície externa (CREMON et al., 2009; SILVA et al., 2014, CARDUCCI et al., 2016; FAUSTINO, 2018).

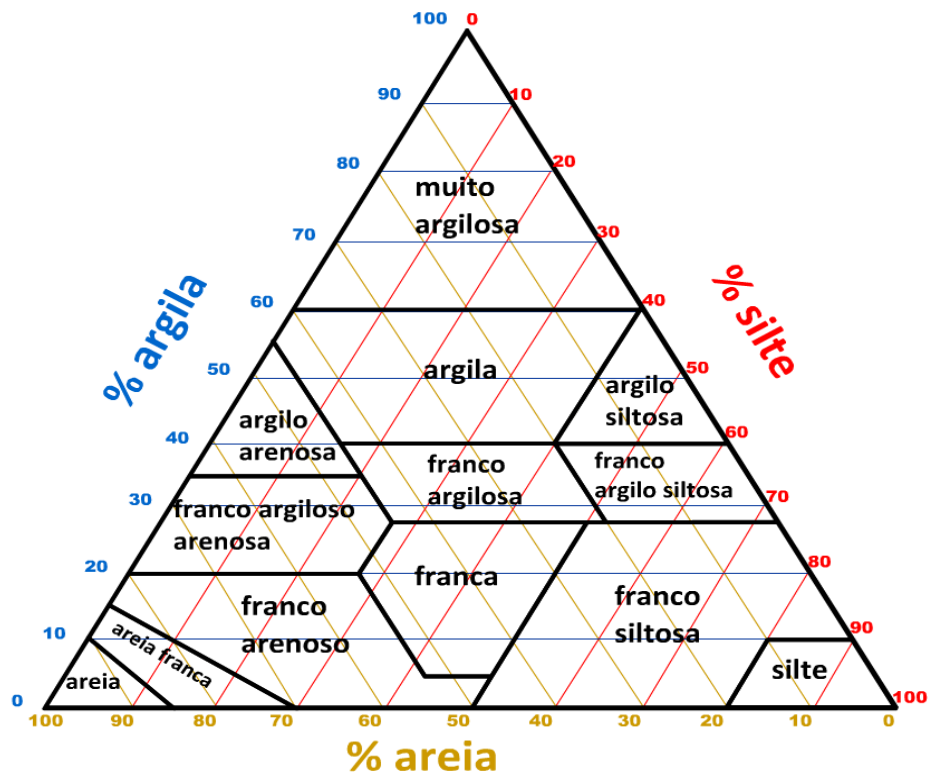
Deste modo, serão discutidas nesse capítulo as propriedades físicas relacionadas à qualificação morfométrica dos agregados em áreas degradadas pela mineração em diferentes níveis de recuperação.

### 3.1.1 Indicador Físico do Solo

Considerando que o entendimento da qualidade física do solo é fundamental, principalmente quando se visa propor um plano de recuperação de uma área degradada, as duas propriedades físicas consideradas mais importantes, referem-se à textura e a estrutura do solo (REINERT; REICHERT, 2006). O solo possui uma combinação de estruturas líquida, gasosa e sólida. A parte sólida do solo é formada por agregados, resultantes da união de partículas minerais, areia, silte e argila, além de raízes, organismos macro/microscópicos e componentes orgânicos (húmus e matéria orgânica) associados às substâncias cimentantes.

De acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo a caracterização da textura do solo está relacionada à proporção relativa das frações argila, silte ou areia no solo, por meio do diagrama triangular simplificado (EMBRAPA, 2013), é feita a análise da diferença das partículas para designar diversas classes texturais utilizado na classificação do solo (figura 3).

Figura 3 - Diagrama triangular para análise textural do solo.



Fonte: EMBRAPA (2013)

Além da análise textural, o conhecimento qualitativo e quantitativo acerca da estrutura de um solo é indispensável e pode ser realizado mediante o emprego de análises digitais fornecendo informações geométricas fundamentais sobre os agregados do solo. Essa técnica denominada análise morfométrica, permite comparar tipos de solos e relacionar com maior ou menor impacto à estrutura, ou mesmo na obtenção de conhecimento e monitoramento da melhoria estrutural.

A estrutura física do solo é resultado da combinação de partículas primárias e secundárias dos agregados que nas suas diferentes formas, tamanhos e arranjos originam unidades estruturais que determinam a condição de agregação e estabilidade do solo. Os agregados são considerados componentes condicionadores da qualidade estrutural do solo, responsáveis pela infiltração, aeração, armazenamento de água, retenção de nutrientes e desenvolvimento de raízes. Com a ocupação e uso das terras, as atividades antrópicas passaram a interferir diretamente no processo de agregação, influenciando em cinco condições estruturais que qualificam a camada superficial do solo: aeração, armazenamento de água, permeabilidade, resistência à erosão e suporte para a biodiversidade (FAUSTINO, 2018).

Segundo Hermani (2018), a agregação não pode ser considerada uma reação apenas física, química ou biológica e sim, o reflexo da interação de todas essas forças atuando no solo. De acordo com o autor, é possível considerar a agregação como um bom indicador da saúde, estado global e da qualidade do solo, pois dentro de um horizonte, agregados de morfologias diversas podem coexistir e cada tipo de agregado tem seu próprio significado em termos de história, de funcionamento e de fertilidade do solo (PECHE FILHO, 2018).

O estudo quantitativo e qualitativo da estrutura do solo tem se tornado mais comum e por meio de técnicas e equipamentos específicos, é possível analisar a morfometria do agregado obtendo-se respostas significativas relacionadas à qualidade do solo. Segundo Olszewski et al. (2004), a análise de imagens mostra-se sensível à detecção de mudanças na morfologia dos agregados do solo, sendo bastante promissora como uma ferramenta de estudos ambientais.

A análise morfométrica mais tradicional dos agregados pode ser dividida basicamente em cinco etapas: (1) peneiramento do solo em diferentes diâmetros; (2) aquisição das imagens individuais dos agregados, seja por scanner ou por câmeras microfotográficas; (3) análise das imagens por meio de *softwares* livres como exemplo o Image J<sup>®</sup>; (4) análise estatística, e (5) interpretação dos resultados gerados (FAUSTINO, 2018). Os parâmetros físicos considerados fundamentais no estudo da forma morfométrica dos agregados do solo são: diâmetro médio geométrico, massa, área, arredondamento, densidade total, circularidade e diâmetro de Feret.

O uso de indicadores ambientais para avaliar a qualidade do solo apresenta alto potencial, devido à sensibilidade às mudanças ambientais e à possibilidade de entender seu funcionamento. Eles são capazes de traduzir a complexidade das condições ambientais, tornando-se cada vez mais eficaz na tomada de decisões, auxiliando na avaliação, identificação de ações prioritárias e antecipação de tendências futuras (Carvalho et al., 2019).

De acordo com Santos (2010), ainda há muito a ser explorado no que diz respeito à identificação de novos indicadores para a avaliação da qualidade física do solo, principalmente no caso dos solos que compõem os diferentes biomas brasileiros, demandando estudos sobre o uso de atributos físico-híbridos como forma de aferição de sua sustentabilidade ecossistêmica.

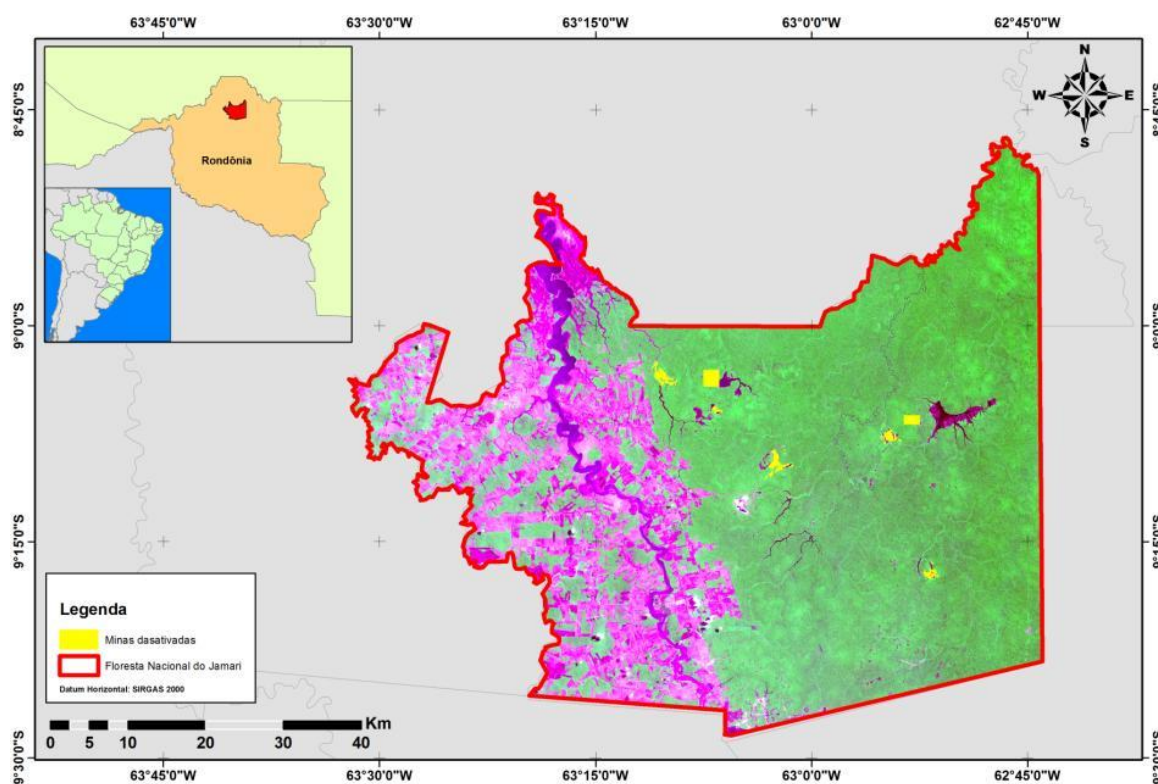
## 3.2. METODOLOGIA

### 3.2.1 Área de estudo e as principais características

A Floresta Nacional do Jamari do Jamari - FLONA, administrada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Minerais Renováveis – IBAMA, está situada a 90 km da cidade de Porto Velho – RO (Figura 4). Sua área total é de aproximadamente 225.000 ha, dos quais 90% estão cobertas por Floresta Tropical Aberta, onde são encontradas espécies de alto valor comercial para exploração de madeira e reservas minerais (LONGO et al., 2011).

Os solos são predominantemente da classe Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico e Latossolo Amarelo distroférico (EMBRAPA, 1999). O clima da região é quente e úmido, com temperaturas médias de 24 °C e precipitação pluvial anual de 2550 mm. A umidade relativa do ar se mantém entre 80% a 85%, havendo uma estação seca bem definida, de julho a agosto.

Figura 4 – Localização da área em estudo.



Fonte: CBERS 4 cena 175 / 110 de 17 de setembro de 2015 (INPE, 2015; Fengler, 2018).

Legenda: Composição de falsa cor: banda vermelha no canal R, banda do infravermelho próximo no canal G e faixa verde no canal B.

O estudo foi desenvolvido em seis áreas mineradas e desativadas, utilizadas para exploração de cassiterita, que foram recuperados desde os anos 90, visando à reintegração à paisagem dominante da Amazônia. Ao longo do tempo, os processos envolvidos durante a mineração resultam em características estruturais do solo que decorrem do tipo e da composição da rocha matriz, dos processos de degradação, do tempo de exposição do material remanescente e tipo de manejo realizado ao longo do tempo.

Devido à heterogeneidade do solo minado, preliminarmente foi realizada a preparação do local e estabelecimento das ações, em seguida foi realizado um zoneamento ambiental dos locais minerados, por meio da avaliação de dano ambiental (Ribeiro et al., 2015). Dessa forma, torna-se necessário uma caracterização da área experimental em relação ao substrato, classe textural do solo, idade de manejo e nível de desenvolvimento (Tabela 1).

**Tabela 1** - Descrição geral da Área

| <b>Mina</b>     | <b>Nome da área</b> | <b>Idade</b> | <b>Substrato</b>     | <b>Classe Textural</b> | <b>Estágio</b>        |
|-----------------|---------------------|--------------|----------------------|------------------------|-----------------------|
| <b>Mina 1</b>   | Nível 0 de RAD      | 0            | Mina Céu aberta      | Siltílica              | Nível 0               |
| <b>Mina 2</b>   | Duduca A3           | 10           | Washing Plating (WP) | Arenosa                | Intermediário         |
| <b>Mina 3</b>   | 14 de Abril A5      | 12           | Rejeito Seco (RS)    | Arenosa                | Intermediário         |
| <b>Mina 4</b>   | Santa Maria 6       | 15           | Piso de Lavra (PL)   | Argilosa               | Intermediário         |
| <b>Mina 5</b>   | Serra da Onça A8    | 20           | Piso de Lavra (PL)   | Argilo arenosa         | Avançado              |
| <b>Mina 6</b>   | Cacimba A1          | 30           | Piso de Lavra (PL)   | Argilosa               | Avançado              |
| <b>Capoeira</b> | Recuperação Natural | 50           |                      | Argilosa               | Sistema de Referencia |
| <b>Mata</b>     | Natural             | <100         |                      | Argilosa               | Natural               |

Na área experimental quatro estágios de recuperação foram amostrados para levantamento de dados do processo de recuperação, sendo esses: área ainda minerada, consideradas Mina céu aberto sem nenhuma ação de recuperação, área em processo de recuperação intermediária e avançada, e ecossistema de referência sendo uma capoeira em processo de regeneração natural e floresta nativa.

- 1) Nível Zero: área minerada sem qualquer tipo de tratamento para recuperação, e atualmente é uma mina a céu aberto;

- 2) Áreas em estágio de recuperação intermediário e avançado. Áreas que sofreram reconstrução topográfica, adubação química e verde com plantio de espécies nativas adensadas e enriquecidas durante 10 – 30 anos.
- 3) Capoeira é uma área de entorno em processo de regeneração natural à aproximadamente 50 anos;
- 4) Floresta natural, uma mata nativa sem interferência antrópica.

Todos os substratos foram classificados de acordo com suas características físicas e químicas, em três principais zonas ambientais: [1] Piso de Lavra, [2] Rejeito Seco, [3] Washing Plating (FENGLER, 2018):

**[1] Piso de Lavra (PL):** solo-substrato obtido por meio da abertura de cavas para a exploração de cassiterita. Devido às operações de movimentação de terras ocorre à exposição de encostas, do subsolo e algumas vezes da própria rocha. O material exposto onde deverá se proceder à recuperação, possui características distintas do solo original, em virtude do tipo de material, do processo de abertura da cava, da necessidade de vias de acesso e do volume do minério explorado (Fengler, 2017).

**[2] Rejeito Seco (RS):** substrato localizado próximo à barragem de contenção de rejeitos possui granulometria com partículas maiores, principalmente areia, apresenta pouca ou nenhuma estrutura de solo, baixa ou baixíssima fertilidade natural e algumas vezes dificuldades de mecanização. Nota-se também, pela própria característica arenosa, uma alta permeabilidade, o que torna o material com baixa capacidade de retenção de água (LONGO et al. 2011).

**[3] Washing Plant (WP):** substrato localizado próximo à área de lavagem de minério, geralmente próximo aos cursos de água, com constituição do material fino, predominantemente arenoso. Nas áreas de atuação de WP a deposição de rejeitos fica restrita as caixas de flutuação, com variação granulométrica destes no sentido vertical, não se espalhando desta forma pelo terreno. A separação das caixas de flutuação é feita por bermas, com solo original parcialmente mantido, facilitando a regeneração natural (RIBEIRO, 2005).

Como os rejeitos são muito erodíveis, com efeitos adversos sobre o crescimento das plantas e cursos de água, esse processo se tornou um requisito nas Leis ambientais brasileiras. Como resultado, este substrato tende a ter melhores

características físicas e químicas do que as áreas de rejeito seco e úmido, no entanto, ainda são altamente dependentes das propriedades do material depositado (Ribeiro et al., 2015, Yada et al., 2015, Longo et al., 2011).

### **3.3. Coleta de dados**

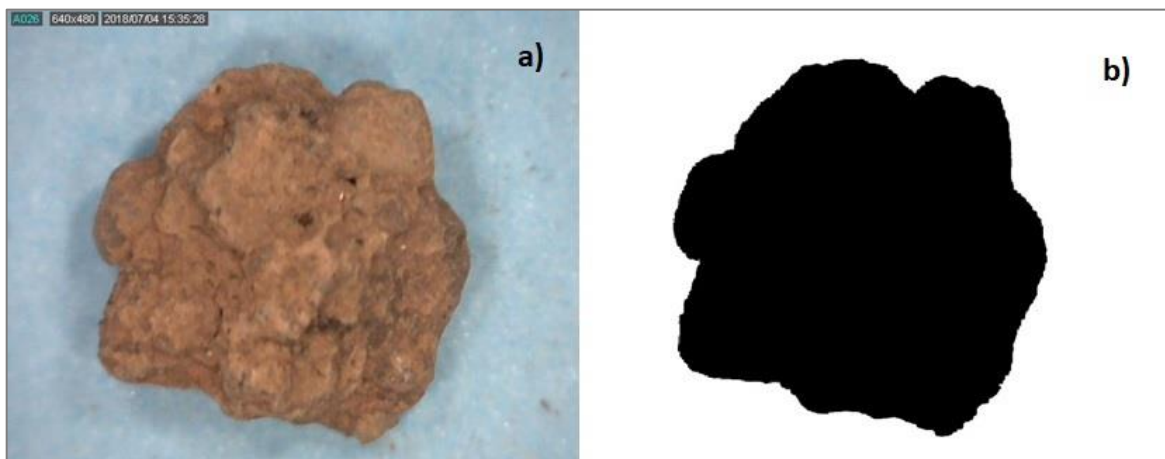
As áreas em recuperação na FLONA do Jamari possuem dados de análises realizadas no período entre 2010 a 2016, disponibilizados pelo convênio entre a companhia mineradora, com Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP e Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Essas áreas demonstram boa resposta a condição de diversidade biológica demonstrada na análise de monitoramento fitossociológico em estudos anteriores (Fengler et al. 2017).

As coletas de solo foram realizadas seguindo o procedimento de amostragem em parcela de 10 m x 10 m. Em cada parcela foram coletadas cinco amostras de aproximadamente 1,5 kg, na profundidade de 0-10 cm, no final da época de chuva, de maneira a permitir a comparação com as amostras e ensaios já realizados em 2015.

Após a coleta, as amostras foram destinadas para análises, onde permaneceram 15 dias em temperatura ambiente (30 a 35 °C) para secagem ao ar livre, em seguida aproximadamente 200 g de solo foi peneirado em um conjunto de 5 peneiras, sendo a primeira com abertura de 6,0 mm, a segunda com abertura de 4,0 mm, a terceira de 2,0 mm, a quarta de 1,0 mm e a quinta com 0,71  $\mu$ m.

O material retido nas peneiras foi pesado para adquirir os dados referentes ao DMG de cada área de estudo, em seguida foram selecionados aleatoriamente 100 agregados para serem fotografados no microscópio digital (Dino Lite modelo AM-211), com processamento no programa Image J<sup>®</sup> para análise morfométrica dos agregados do solo. As imagens foram convertidas em preto e branco eliminando os ruídos para determinação dos parâmetros morfométricos do agregado (Figura 5).

Figura 5 - Imagem do agregado bruta (a) e imagem processada (b).



Para as análises físicas do solo como, diâmetro médio geométrico, massa, área, arredondamento, densidade total, circularidade e diâmetro de Feret, utilizou-se a metodologia padronizada da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017).

### 3.3.1. Determinação dos atributos físicos dos agregados do solo

**[1] Diâmetro Médio Geométrico (DMG):** O cálculo do DMG de uma amostra de solo pondera o logarítmico de cada classe pela massa de agregados retidos em cada peneira após pesados em balança semi-analítica, anotou-se os novos valores de massa encontrados. Com os valores de massa retida foi realizado o cálculo de Diâmetro Médio Geométrico (DMG), utilizando o método proposto por Mazurak (1950), conforme equação 1. De acordo com Zalmena et al. (2008) altos valores de DMG caracterizam um solo mais agregado.

(Equação 1)

$$DMG = 10 \cdot \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \log_{10} \bar{d}_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \right]$$

Onde,

n é o número de classes de tamanho de agregados;

$x_i$  é a porcentagem da massa de solo retida em cada classe de tamanho [g]

$\bar{d}_i$  é o diâmetro médio da classe dos grãos [mm].

**[2] Área do agregado:** A área do agregado foi avaliada por meio da quantidade de pixels contida em cada imagem processada e os valores foram

convertidos em milímetros (mm<sup>2</sup>) após a calibração, para o processamento dos dados de cada mina.

**[3] Arredondamento do agregado:** O índice de Arredondamento é expressão dos graus de curvatura das arestas e vértices do contorno das partículas, considerando as bordas irregulares ao longo do perímetro e rugosidade de todos os lados. Wadel (1931) definiu uma aresta como sendo cada parte do contorno de uma área que tenha um raio de curvatura do máximo do círculo inscrito na mesma área. O arredondamento das partículas foi calculado comparando sua área em função do seu perímetro, como mostrado na equação 2, (COX, 1927; RIBEIRO; BONETTI, 2013).

(Equação 2) 
$$I_{Ar} = 4 \pi A/p^2$$

Onde,  
A é a área do agregado  
P é o perímetro do agregado.

**[4] Circularidade do Agregado:** O índice de circularidade expressa o quanto a morfologia do agregado está próxima da esfericidade perfeita, comparando a área da partícula em função de seu eixo maior, calculada a partir da equação 3. Quanto mais “alongada” a partícula for, maior será o seu eixo principal e conseqüentemente menor o seu grau de circularidade, enquanto valores próximos à 1,0 correspondem a forma circular perfeita (PERTLAND, 1917; RIBEIRO; BONETTI, 2013). Desta forma, o valor da partícula próximo de 0,0, indica uma forma mais alongada e quando aproxima-se de 1,0, indica um círculo perfeito.

(Equação 3) 
$$IC = 4A/\pi (L)^2$$

Onde,  
A é a área do agregado  
L é o eixo maior do agregado.

**[5] Diâmetro de Feret:** Consiste na maior distância entre dois pontos ao longo do limite da imagem processada, no caso o agregado do solo, calculado por meio da equação 4:

(Equação 4)

$$DF = 4 Ar/\pi$$

Onde,

Ar é a arredondamento do agregado.

O MAX/MIN é a relação entre menor diâmetro e maior a partir das medidas Feret e podem ser utilizadas para o estudo de partículas irregulares, pois representam o diâmetro que cruza o centro de determinado objeto tomando alguma direção arbitrária (Equação 5) (Wang et al., 2014).

(Equação 5)

$$Dr = \frac{D_{\min}}{D_{\max}}$$

**[6] Densidade Total do Solo:** É a relação entre a massa de uma amostra de solo seca e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros. A amostra foi colocada em uma estufa de secagem com temperatura de 105° C em um período de 5 dias. Após o processo de secagem em estufa, tem-se a massa do solo antes (mA) e depois (mD). Tendo a massa e o volume já conhecido do anel metálico ( $V_A$ ), encontra-se a densidade. Calculado a partir da equação 6:

(Equação 6)

$$D_T = m_A/V_A$$

Onde,

Dt é a densidade do solo;

Ma corresponde à massa do solo contido no anel de volume Va.

### 3.3.2. Análise estatística descritiva

Os resultados foram submetidos à análise descritiva univariada, na qual foram determinadas as medidas de tendência central (média) e de variabilidade (desvio padrão) e de dispersão relativa (coeficiente de variação).

**Média aritmética ( $\bar{X}$ ):** é o valor que aponta para onde mais se concentram os dados de uma distribuição. A média aritmética é a soma dos valores a i's divididos por n. Se n = número dados, cada número denotado por i corresponde a 1, conforme equação 7.

(Equação 7) 
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{x_{+}}{n}$$

Onde,

X = média aritmética é a soma dos valores a i's divididos por n;

n = número dados.

**Desvio padrão (S):** é a medida mais comum da dispersão estatística, que mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média. Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores (equação 8).

(Equação 8) 
$$S = \frac{\sqrt{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}}{n - 1}$$

**Coefficiente de variação (CV)** é uma medida de dispersão relativa, empregada para estimar a precisão de experimentos e representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média, conforme equação 9.

(Equação 9) 
$$CV = \frac{S}{\bar{X}}(100)\%$$

Onde,

S é o desvio padrão em relação à média

X é a média aritmética das amostras.

Quanto menor for o coeficiente de variação, mais homogêneo é o conjunto de dados, sendo assim Panquestor et al., (2004) utilizou a seguinte representatividade (Tabela 2).

**Tabela 2** - Representatividade do coeficiente de variação

| Coeficiente de Variação (CV)                    | Variabilidade                        |
|---|--------------------------------------|
| CV < 10<br>10 = V < 20<br>20 = V < 30<br>V = 30 | Baixo<br>Médio<br>Alto<br>Muito Alto |

### 3.3.3. Análise estatística Multivariada

Para verificação das diferenças entre as áreas de estudo no que se refere aos parâmetros morfométricos, tratamentos, estágio de recuperação em relação à florestal natural, foi realizado à análise de variância multivariada (MANOVA), comparando as médias amostrais de variáveis dependentes, tomando o Teste Tukey na comparação das médias (5% de probabilidade). Os métodos estatísticos multivariados possibilitam explorar simultaneamente o relacionamento entre várias variáveis categóricas independentes e duas ou mais variáveis dependentes métricas, procurando verificar se existem diferenças entre grupos a partir de padrões que reflitam as dinâmicas ambientais similares (SODRÉ et al., 2007). A ferramenta MANOVA compara diferença entre os tratamentos para as variáveis e utiliza estatística Wilks para testar a igualdade entre os tratamentos, as hipóteses do teste são:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \\ H_1: \text{ao menos duas são diferentes} \end{array} \right\}$$

em que  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  são as médias dos tratamentos

No entanto os dados apresentaram distribuição anormal, deste modo foi necessário realizar normalização antes da MANOVA, por meio do Box Cox. A transformação de potência é definida como uma função de variação contínua, com relação ao parâmetro de potência  $\lambda$ , em uma forma de função que a torna contínua no ponto de singularidade ( $\lambda = 0$ ). A transformação de Box-Cox consiste em encontrar um  $\lambda$  tal que os dados transformados  $Y_1, \dots, Y_n$  se aproximem de uma distribuição normal nos quais cada  $Y_i > 0$ . A transformação de potência é definida como uma função de variação contínua, em relação ao parâmetro de potência  $\lambda$ , ou seja,  $x^\lambda$ , de acordo com a equação 10:

$$(Equação 10) \quad Y_i(\lambda) = \begin{cases} \text{Log}(x) & \text{se } \lambda = 0 \\ \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{se } \lambda \neq 0 \end{cases}$$

O parâmetro  $\lambda$  é estimado usando a função de probabilidade do perfil.

### 3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### [1] Diâmetro Médio Geométrico (DMG):

Os valores médios determinados de DMG para áreas mineradas (Tabela 3) mostraram que os maiores valores de DMG ocorreram na área denominada Mata (3.38 mm), esse resultado pode ter ocorrido em virtude, principalmente, da maior cobertura vegetal, menor exposição do solo às ações da chuva e menor intervenção antrópica (CAMPOS et al., 1999), demonstrando processo de agregação do solo positivo. Já na Capoeira, o valor foi intermediário (3.2 mm) entre os locais em recuperação e a floresta primária, enquanto a área experimental denominada mina 1, área recém minerada sem nenhuma ação de recuperação, não apresentou valores que demonstrassem agregação substancial (1.07 mm) (Tabela 3).

As áreas em processo de recuperação apresentam valores de agregação medianos, porém próximos aos valores da Capoeira, caracterizando um solo mais agregado (ZALAMENA et al., 2008; LIU et al., 2020). Os valores de DMG nas áreas em recuperação em nível intermediário e avançado (mina 2, 3, 4, 5 e 6) são valores intermediários entre a mina 1 e a Capoeira e Mata, com pequena variação entre 2.10 mm e 2.56 mm, demonstrando que as áreas que foram degradadas e tiveram diferentes tipos de intervenções com planos de gestão de recuperação, mesmo não possuindo resposta homogênea, possuem resposta satisfatória para esse parâmetro (Tabela 3).

**Tabela 3** - Valores médios determinados de DMG para todas as minas (mm).

| <b>DMG</b>       | <b>Mina 1</b> | <b>Mina 2</b> | <b>Mina 3</b> | <b>Mina 4</b> | <b>Mina 5</b> | <b>Mina 6</b> | <b>Capoeira</b> | <b>Mata</b> |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| Amostra 1        | 1.11          | 1.99          | 2.25          | 2.52          | 2.12          | 2.17          | 2.47            | 3.28        |
| Amostra 2        | 1.02          | 2.68          | 2.50          | 2.48          | 2.08          | 2.34          | 3.93            | 3.39        |
| Amostra 3        | 1.14          | 2.82          | 2.37          | 2.50          | 2.10          | 2.25          | 3.20            | 3.45        |
| Amostra 4        | 1.01          | 2.79          | 2.45          | 2.56          | 2.09          | 2.78          | 3.19            | 3.41        |
| Média            | <b>1.07</b>   | <b>2.57</b>   | <b>2.39</b>   | <b>2.52</b>   | <b>2.10</b>   | <b>2.38</b>   | <b>3.20</b>     | <b>3.38</b> |
| Desvio padrão    | 0.05          | 0.70          | 0.11          | 0.03          | 0.02          | 0.27          | 0.60            | 0.07        |
| Coef. Variação % | 3.94          | 4.86          | 4.60          | 1.29          | 0.79          | 1.48          | 8.69            | 2.15        |

De acordo com Loss (2015), baixos valores de DMG podem estar relacionados com a alta compactação do solo, dificultando a infiltração de água no perfil pela redução da porosidade. Enquanto, altos valores de DMG representam um solo com

boa agregação e conseqüentemente elevado nível de estabilidade estrutural (MADARI et al., 2005; BARROS et al., 2018; BRIZZI et al., 2019).

No sudoeste de Minas Gerais em solo minerado caracterizado como Nitossolo Vermelho e textura argilosa, as médias encontradas para o DMG variaram entre 4.78 mm e 3.79 mm, após recuperação. Os autores salientam que, os valores obtidos na avaliação da estabilidade de agregados são superiores ao DMG encontrado em áreas de Latossolo e que esses valores podem variar dependendo das características individuais do solo (OLIVEIRA et al., 2004). Garbiate et al., (2011), concluíram que os manejos intensivos, proporcionam menores valores de DMG, indicando a destruição dos agregados do solo. Desta forma, atividades minerárias geram impactos negativos sobre a estrutura física do solo comprometendo a estabilidade de agregados, no entanto, após processo de recuperação essas características podem melhorar (BARROS et al., 2018).

Esses resultados corroboram com os dados de vegetação (FENGLER et al, 2019), pois dentro do período estudado, todas as áreas mineradas em processo de recuperação apresentaram aumento significativo nas variáveis fitossociológicas: densidade de regeneração natural, altura média, cobertura basal e riqueza média (Tabela 4).

**Tabela 4** – Dados de vegetação das áreas mineradas entre 2015-2019 (%).

| <b>Variáveis<br/>Fitossociológicas</b>      | <b>Mina 1</b> | <b>Mina 2</b> | <b>Mina 3</b> | <b>Mina 4</b> | <b>Mina 5</b> | <b>Mina 6</b> |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Altura média</b>                         | -             | 42.0          | 23.1          | 16.1          | 21.2          | 15.1          |
| <b>Área basal</b>                           | -             | 26.7          | 70.0          | 22.1          | 6.5           | 77.5          |
| <b>Riqueza média</b>                        | -             | 17.9          | 20.0          | 16.5          | 17.5          | 29.7          |
| <b>Densidade de<br/>Regeneração Natural</b> | -             | 49.8          | 55.0          | 48.5          | 42.5          | 44.5          |

Segundo Loss et al. (2015), os valores de DMG, nos tratamentos com plantas de cobertura e mesmo com a vegetação espontânea em relação à área de mata, indicam que a revegetação é eficiente para melhorar e aumentar a agregação do solo em área que foi manejada. Pois, o crescimento radicular atuando conjuntamente com os efeitos físico, químico e biológico estimula a atividade microbiana, cujos subprodutos atuam na formação e estabilização dos agregados, aumentando o índice DMG do solo (SIX et al.,2004; LOSS et al., 2015).

A vegetação proporciona adequada cobertura vegetal do solo, o que impede a ação direta das gotas de chuva sobre o solo e mantém mais uniforme a umidade e temperatura do solo, além de aumentar a matéria orgânica (PANACHUKI et al., 2011), por consequência, propicia condições ideais para a atividade biológica que atuará direta e indiretamente na formação dos macroagregados. Sendo assim, a atividade biológica e matéria orgânica influenciam positivamente na agregação do solo, proporcionando maior estabilidade estrutural refletindo na taxa do DMG e permitindo avaliar modificações significativas em solo degradado (TIECHER, 2016).

## [2] Área do agregado (A):

Os valores médios da área do agregado apresentados na Tabela 5, são crescentes à medida que se aproximam do ecossistema de referência, considerada área natural. No entanto, apenas os resultados nas peneiras 0.71 e 1.0 mm apresentaram coeficiente de variação significativo ( $CV < 25\%$ ), enquanto as demais peneiras apresentaram pequenas variações no coeficiente de variação e média de dispersão dentro da normalidade por se tratar de amostras de solos heterogêneos e com tipos de manejos diferenciados entre si, apontando maior variabilidade para essa variável nas peneiras de 2.0, 4.0 e 6.0 mm.

**Tabela 5** – Valores médios determinados para a área dos agregados ( $\text{mm}^2$ ) nas peneiras com 5 diâmetro de aberturas diferentes.

| Peneira | Área               | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata   |
|---------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| 0.71    | Média              | 117.74 | 128.88 | 138.90 | 145.22 | 162.45 | 150.17 | 165.89   | 191.13 |
|         | Desvio padrão      | 7.02   | 8.92   | 8.63   | 8.43   | 8.77   | 9.37   | 9.64     | 9.72   |
|         | Coef. Variação (%) | 19     | 25     | 25     | 20     | 22     | 23     | 23       | 21     |
| 1.0     | Média              | 111.92 | 129.26 | 152.64 | 162.18 | 142.48 | 136.06 | 145.68   | 125.13 |
|         | Desvio padrão      | 3.70   | 3.91   | 3.63   | 4.48   | 4.11   | 3.58   | 5.29     | 3.16   |
|         | Coef. Variação (%) | 20     | 20     | 24     | 18     | 19     | 26     | 19       | 20     |
| 2.0     | Média              | 127.53 | 164.52 | 148.41 | 187.79 | 175.26 | 187.38 | 150.00   | 179.29 |
|         | Desvio padrão      | 5.13   | 5.97   | 5.24   | 7.95   | 6.80   | 6.26   | 6.09     | 5.21   |
|         | Coef. Variação (%) | 41     | 36     | 39     | 41     | 38     | 36     | 41       | 33     |
| 4.0     | Média              | 177.78 | 237.92 | 288.86 | 364.19 | 289.50 | 247.07 | 331.55   | 201.89 |
|         | Desvio padrão      | 7.89   | 8.31   | 9.62   | 8.12   | 7.57   | 5.89   | 7.43     | 7.26   |
|         | Coef. Variação (%) | 41     | 34     | 34     | 30     | 24     | 24     | 35       | 18     |
| 6.0     | Média              | 233.01 | 267.63 | 240.16 | 217.25 | 204.64 | 379.22 | 382.45   | 360.73 |
|         | Desvio padrão      | 9.41   | 9.16   | 6.01   | 9.41   | 7.26   | 7.84   | 8.46     | 5.21   |
|         | Coef. Variação (%) | 36     | 25     | 45     | 42     | 27     | 45     | 49       | 44     |

\*a média calculada corresponde à 100 agregados analisadas no software Image J<sup>®</sup>.

Nessa análise, os agregados de menor diâmetro (0.71 e 1.0 mm), podem ter sido favorecidos pelo fato de representar agregados com menor manipulação no preparo, diminuindo alterações que permitissem a fragmentação e quebra dos agregados, resultando em valores mais consistentes dentro da faixa de coeficiente de variação significativo.

Cremon et al. (2009), trabalhando com análise morfométrica de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso, relataram que as diferenças de área dos agregados se devem ao aporte de material vegetal ao solo. Agregados maiores são geralmente indicativos de boa qualidade, uma vez que eles possuem uma distribuição de tamanho de poros que melhoram a relação ar-água e favorecem o melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas (CREMON et al., 2009; CARDUCCI et al., 2016).

Em áreas degradadas ou em recuperação, o ideal é que se busque manejar o solo com o objetivo de obter agregados de maior diâmetro, pois uma condição estrutural adequada influencia os regimes de água, ar e calor do solo (FAUSTINO, 2018). Neste estudo as áreas recuperadas forneceram valores iguais ou até superiores aos do ecossistema de referência em todas as classes de tamanhos, revelando o efeito positivo do processo de formação de agregados do solo minerado.

### **[3] Arredondamento do agregado (Ar):**

Os valores relacionados ao arredondamento dos agregados encontram-se entre 0.70 à 0.80, próximos da esfericidade absoluta (RITTENHOUSE, 1943). Os valores de desvio padrão e coeficiente de variação mostraram baixa dispersão em torno da média, com pequenos intervalos dentro da distribuição normal, conforme Tabela 6. De acordo com Peche (2018), o coeficiente de variação permite perceber a condição de agregação em função a uma tendência de forma, pois valores superiores a 25% podem indicar que a amostra apresenta uma agregação instável.

Tendência semelhante foi observada no estudo sobre morfometria do agregado de solo sob diferentes coberturas vegetais no Rio de Janeiro, os valores apresentados foram entre 0.51 e 0.70, sendo que os maiores valores ocorreram na peneira com malha de maior diâmetro (FAUSTINO, 2018).

**Tabela 6** - Valores médios determinados de arredondamento (%) dos agregados.

| Arredondamento |                    | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata |
|----------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|------|
| 0.71           | Média              | 0.70   | 0.75   | 0.72   | 0.72   | 0.71   | 0.73   | 0.73     | 0.75 |
|                | Desvio padrão      | 0.10   | 0.10   | 0.12   | 0.12   | 0.14   | 0.13   | 0.12     | 0.11 |
|                | Coef. variação (%) | 13     | 14     | 17     | 16     | 19     | 19     | 16       | 15   |
| 1.0            | Média              | 0.70   | 0.74   | 0.72   | 0.72   | 0.75   | 0.73   | 0.74     | 0.75 |
|                | Desvio padrão      | 0.12   | 0.11   | 0.13   | 0.13   | 0.12   | 0.11   | 0.12     | 0.12 |
|                | Coef. variação (%) | 16     | 15     | 18     | 18     | 17     | 15     | 16       | 15   |
| 2.0            | Média              | 0.73   | 0.74   | 0.76   | 0.77   | 0.75   | 0.74   | 0.75     | 0.78 |
|                | Desvio padrão      | 0.09   | 0.12   | 0.11   | 0.11   | 0.12   | 0.11   | 0.12     | 0.10 |
|                | Coef. variação (%) | 12     | 16     | 15     | 15     | 16     | 15     | 17       | 14   |
| 4.0            | Média              | 0.73   | 0.80   | 0.78   | 0.78   | 0.75   | 0.76   | 0.77     | 0.77 |
|                | Desvio padrão      | 0.15   | 0.11   | 0.12   | 0.10   | 0.10   | 0.11   | 0.15     | 0.10 |
|                | Coef. variação (%) | 20     | 14     | 15     | 13     | 14     | 14     | 20       | 03   |
| 6.0            | Média              | 0.72   | 0.73   | 0.72   | 0.75   | 0.74   | 0.75   | 0.73     | 0.75 |
|                | Desvio padrão      | 0.14   | 0.16   | 0.15   | 0.10   | 0.16   | 0.11   | 0.14     | 0.10 |
|                | Coef. variação (%) | 18     | 22     | 21     | 13     | 22     | 15     | 19       | 13   |

\*a média calculada corresponde à 100 agregados analisadas no software Image J<sup>®</sup>.

Segundo Hickamn et al., (2011), valores menores de Arredondamento devem ser encontrados nos agregados provenientes de tipos de manejo mais destrutivos à estrutura, pois estes tendem a perder a rugosidade da superfície externa, diminuindo o valor do perímetro, comprimento da projeção do limite exterior do agregado e tendendo ao arredondamento (OLSZEWSKI et al., 2004). Para Riva (2010), o arredondamento é uma medida do grau de agudez ou curvatura dos cantos e arestas de um agregado, portanto reflete características de percolação e transporte de sedimentos para o interior do perfil do solo.

#### **[4] Circularidade do Agregado (Cir):**

A média da circularidade dos agregados encontra-se entre 0.44 à 0.70, considerados valores intermediários entre o alongamento e distante da circularidade plena. É possível constatar que os dados obtidos para cada amostra não se dispersam muito em torno da média, pois o valor de desvio padrão baixo, e o coeficiente de variação encontra-se dentro da faixa de normalidade de distribuição dos dados (<25%), a um nível de confiança de 95%, como pode ser observado na Tabela 7.

As maiores médias encontradas nessas áreas foram na Mina 5 e 6, Mata e Capoeira, pois possuem solos argilosos e estão em nível avançado de recuperação. No entanto, a Mina 1, mostrou-se também com uma circularidade intermediária, tal condição está associada com a característica do próprio mineral, mesmo não possuindo agregação substancial.

**Tabela 7** – Valores médios determinados para circularidade (%) dos agregados.

| mm   | Circularidade      | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata |
|------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|------|
| 0.71 | Média              | 0.60   | 0.62   | 0.63   | 0.62   | 0.65   | 0.64   | 0.68     | 0.69 |
|      | Desvio padrão      | 0.10   | 0.06   | 0.09   | 0.09   | 0.10   | 0.11   | 0.08     | 0.11 |
|      | Coef. variação (%) | 16     | 10     | 14     | 14     | 15     | 17     | 14       | 18   |
| 1.0  | Média              | 0.60   | 0.58   | 0.62   | 0.66   | 0.66   | 0.66   | 0.61     | 0.68 |
|      | Desvio padrão      | 0.07   | 0.09   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07     | 0.08 |
|      | Coef. variação (%) | 11     | 17     | 13     | 10     | 10     | 10     | 12       | 12   |
| 2.0  | Média              | 0.44   | 0.47   | 0.61   | 0.64   | 0.66   | 0.67   | 0.66     | 0.61 |
|      | Desvio padrão      | 0.08   | 0.12   | 0.10   | 0.08   | 0.10   | 0.10   | 0.07     | 0.07 |
|      | Coef. variação (%) | 18     | 25     | 16     | 13     | 16     | 15     | 11       | 11   |
| 4.0  | Média              | 0.61   | 0.67   | 0.59   | 0.58   | 0.70   | 0.68   | 0.70     | 0.68 |
|      | Desvio padrão      | 0.12   | 0.07   | 0.14   | 0.12   | 0.05   | 0.07   | 0.04     | 0.14 |
|      | Coef. variação (%) | 20     | 10     | 24     | 21     | 07     | 10     | 06       | 21   |
| 6.0  | Média              | 0.58   | 0.58   | 0.58   | 0.63   | 0.65   | 0.61   | 0.55     | 0.58 |
|      | Desvio padrão      | 0.10   | 0.14   | 0.16   | 0.08   | 0.15   | 0.14   | 0.13     | 0.14 |
|      | Coef. variação (%) | 15     | 24     | 27     | 12     | 23     | 22     | 24       | 24   |

\*a média calculada corresponde à 100 agregados analisadas no software Image J®.

De acordo com Hickmann et al., (2011), o manejo com menor perturbação do solo resulta em maiores valores, em razão da menor quebra de agregados. No entanto, neste trabalho os resultados das áreas mineradas mostraram que houve pouca variação dos valores de circularidade, sendo que todas as áreas em processo de recuperação apresentaram valores superiores a 0.60, indicando que os agregados têm por características um formato mais alongado, tendendo a circularidade (PERTLAND, 1917; RIBEIRO; BONETTI, 2013). Desta forma, o índice de circularidade dos agregados permite confirmar efeitos distintos da degradação em ambientes com níveis de alteração complexa e pode auxiliar na avaliação de diferentes estágios de agregação do solo (CARVALHO et al., 2020).

## [5] Diâmetro de Feret (DF):

O diâmetro de Feret consiste na maior distância entre quaisquer dois pontos ao longo do limite da imagem processada, no caso do agregado do solo os resultados foram obtidos em mm (milímetros). Para esse parâmetro o coeficiente de variação demonstra que os dados possuem alta variabilidade nos maiores diâmetros (6.0 mm), enquanto as demais permaneceram dentro da distribuição normal. Conforme Tabela 8, os maiores valores de diâmetro de Feret ocorreram nas áreas denominadas, Minas 4, 5, 6, Capoeira e Mata. Além disso, é possível notar que os valores de diâmetro de Feret foram aumentando de forma gradativa à medida que o diâmetro das peneiras também aumentou, demonstrando valores maiores nas peneiras de 2.0, 4.0, e 6.0 mm.

Segundo Peche Filho (2018), o diâmetro de Feret é o índice que expressa à forma do agregado, assumindo que a forma de um círculo perfeito são os maiores valores. Considerando que o diâmetro de Feret está fortemente relacionado com a circularidade e as medidas da área dos agregados, os maiores valores geralmente podem ser indicativos de boa qualidade da agregação, por contribuir de forma positiva na funcionalidade ecossistêmica e estabilidade estrutural do solo (CREMON et al., 2009; CARDUCCI et al., 2016).

**Tabela 8** – Valores médios determinados para diâmetro de Feret (mm) dos agregados.

|             | <b>Diâmetro Feret</b> | <b>Mina 1</b> | <b>Mina 2</b> | <b>Mina 3</b> | <b>Mina 4</b> | <b>Mina 5</b> | <b>Mina 6</b> | <b>Capoeira</b> | <b>Mata</b> |
|-------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------|
| <b>0.71</b> | Média                 | 2.14          | 2.26          | 2.00          | 3.03          | 2.83          | 2.98          | 2.89            | 2.79        |
|             | Desvio padrão         | 0.34          | 0.46          | 0.55          | 0.49          | 0.56          | 0.54          | 0.44            | 0.47        |
|             | Coef. variação (%)    | 13            | 17            | 18            | 16            | 18            | 18            | 15              | 17          |
| <b>1.0</b>  | Média                 | 4.61          | 4.12          | 4.62          | 5.68          | 5.47          | 5.25          | 5.30            | 5.96        |
|             | Desvio padrão         | 0.87          | 0.97          | 1.10          | 0.14          | 1.03          | 0.82          | 1.23            | 0.96        |
|             | Coef. variação (%)    | 19            | 19            | 20            | 20            | 19            | 16            | 23              | 19          |
| <b>2.0</b>  | Média                 | 4.81          | 5.04          | 5.14          | 5.86          | 5.84          | 6.05          | 6.88            | 6.30        |
|             | Desvio padrão         | 1.05          | 1.03          | 1.08          | 1.33          | 1.27          | 1.09          | 1.22            | 1.17        |
|             | Coef. variação (%)    | 22            | 17            | 20            | 23            | 22            | 18            | 21              | 22          |
| <b>4.0</b>  | Média                 | 5.77          | 6.16          | 6.21          | 7.47          | 8.23          | 6.98          | 6.96            | 7.78        |
|             | Desvio padrão         | 1.44          | 1.28          | 1.34          | 1.26          | 1.53          | 1.03          | 0.79            | 0.94        |
|             | Coef. variação (%)    | 25            | 19            | 18            | 17            | 19            | 15            | 13              | 25          |
| <b>6.0</b>  | Média                 | 5.77          | 5.04          | 6.05          | 7.28          | 7.05          | 8.37          | 8.32            | 8.11        |
|             | Desvio padrão         | 1.95          | 1.53          | 1.22          | 1.24          | 1.84          | 1.89          | 1.24            | 1.89        |
|             | Coef. variação (%)    | 29            | 32            | 28            | 27            | 30            | 23            | 27              | 23          |

\*\*a média calculada corresponde à 100 agregados analisadas no software Image J®.

## [6] Densidade Total do Solo (Ds):

Os dados de densidade nas áreas em recuperação são próximos a Mata e a Capoeira, conforme Tabela 9. Segundo Reinert e Reichert (2006), os valores normais de Ds para solos arenosos variam de 1.2 a 1.9 g cm<sup>3</sup>, enquanto solos argilosos apresentam valores mais baixos, de 0.9 a 1.7 g cm<sup>3</sup>. Valores de Ds associados ao estado de compactação com alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular e transporte de água situam-se em torno de 1.65 g cm<sup>3</sup> para solos arenosos e 1.45 g cm<sup>3</sup> para solos argilosos.

A densidade do solo fornece indicações a respeito do estado de sua conservação, sendo uma das primeiras propriedades a ser alterada pelos diferentes usos. O manejo do solo nas diversas etapas da mineração aumenta a densidade do solo e, conseqüentemente produz redução da porosidade total que, por sua vez, exercerá influência na capacidade de retenção de água, aeração, drenagem e condutividade hidráulica, afetando diretamente a qualidade do solo.

**Tabela 9** - Densidade Total do solo (g/cm<sup>3</sup>) nos diferentes estágios de recuperação.

| Densidade             | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|------|
| Medidas de Tratamento | 1.64   | 1.37   | 1.31   | 1.33   | 1.36   | 1.38   | 1.32     | 1.41 |

Estudos sobre morfologia de agregados de classes diferentes, inclusive em Latossolos, concluíram que há efeito da qualidade da argila na morfologia externa e tamanho dos agregados. De acordo com os autores, para determinados atributos morfológicos como: área, arredondamento, diâmetro de Feret e circularidade, o efeito do teor e da qualidade dos minerais da fração argila em somente algumas classes de agregados pode ser atribuído à influência de outros fatores importantes na formação e definição dos agregados do solo. Esses fatores teriam relação com o ambiente, o manejo do solo, as propriedades do solo, como textura, composição mineral, teor de C orgânico, processos pedogenéticos, atividade microbiana, íons, umidade e a influência da planta (OLSZEVSKI et al., 2004; HICKAMN et al., 2011).

## [7] Análise multivariada de variância (MANOVA)

A MANOVA foi utilizada para verificar as diferenças entre as médias das variáveis morfométricas das áreas em recuperação em relação ao ecossistema de referência (Floresta Natural), considerando idade de desenvolvimento florestal, substrato, textura, peneiras e suas interações, possibilitou a diferenciação entre as variáveis empregadas. A análise das interações entre morfometria e estágio de desenvolvimento resultou em diferenças significativas em todas as áreas mineradas. No entanto, as variáveis que se destacaram permitindo diferenciar com clareza e separar o ecossistema de referência dos locais mais jovens, locais intermediários e mais antigos foram Área, Circularidade, Feret, Min Feret e Max/Min, apresentando resultados expressivos na diferenciação das áreas em processo de recuperação em concordâncias com os dados brutos (Tabela 10).

A Mina 1 em estágio 0 de recuperação, diferenciou-se de todas as outras com valores médios bem baixos em relação ao ecossistema de referência, quase sempre valores negativos. As Minas em estágio intermediário apresentaram os valores medianos entre o nível 0 (mina 1) e as minas em estágio avançado (Mina 5 e 6). As Minas mais antigas apresentaram os valores próximos ao observado no ecossistema de referência, assim como a mina 4 que mesmo sendo considerada intermediária assemelhou-se as mais antigas do grupo. Acredita-se que o tipo de substrato (PL) e textura argilosa utilizado no manejo das três minas, influenciou positivamente no processo de recuperação dessas áreas em relação às outras (Tabela 10).

**Tabela 10** - Variáveis morfométricas de agregados do solo de minas em relação à diferentes estágios de recuperação e ecossistema natural (MANOVA).

| MINA idade | MINA 1<br>0 | MINA 2<br>10 | MINA 3<br>12 | MINA 4<br>15 | MINA 5<br>20 | MINA 6<br>30 | Capoeira<br>50 | Mata<br><100 |      |    |      |    |      |    |      |   |
|------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|------|----|------|----|------|----|------|---|
| Área       | -0.11       | a            | 0.10         | b            | 0.16         | c            | 0.24           | d            | 0.25 | d  | 0.26 | de | 0.28 | de | 0.32 | e |
| Circul.    | - 0.04      | a            | 0.09         | b            | 0.14         | c            | 0.16           | c            | 0.16 | c  | 0.24 | d  | 0.26 | de | 0.30 | e |
| Feret      | - 0.13      | a            | 0.15         | b            | 0.20         | c            | 0.23           | d            | 0.28 | de | 0.25 | d  | 0.30 | de | 0.33 | e |
| MinFeret   | 0.08        | a            | 0.11         | b            | 0.16         | c            | 0.18           | d            | 0.18 | d  | 0.21 | de | 0.17 | d  | 0.27 | e |
| ARRED.     | 0.12        | a            | 0.09         | ab           | 0.04         | ab           | 0.06           | ab           | 0.15 | b  | 0.19 | b  | 0.12 | ab | 0.22 | b |
| Max/Min    | -0.11       | a            | 0.05         | b            | 0.06         | b            | 0.07           | c            | 0.15 | d  | 0.15 | d  | 0.15 | d  | 0.19 | e |

\* Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, não são significativamente diferentes pelo teste Tukey, a 5%.

As minas em estágio avançado de recuperação com idade de desenvolvimento entre 12 e 30 anos mostraram em alguns aspectos semelhanças entre si, mas diferenciaram do nível 0 e tenderam aproximação do ecossistema de referência, sendo a área com idade de 50 anos representada pela capoeira, uma área degradada, em seguida recuperada de forma natural ao longo dos anos e a Mata, área natural com <100 anos sem grandes modificações ambientais e interferência antrópica (Tabela 10). No entanto, nem sempre é possível diferenciar com exatidão os estágios de desenvolvimento de agregação do solo pela idade, pois outras variáveis como grau de degradação, tipo de substrato, ação de manejo e vegetação, podem influenciar no processo de recuperação de áreas degradadas por mineração.

A análise relacionada às variáveis morfométricas e os substratos apresentaram diferenças significativas, destacando as variáveis: Área, Circularidade, Feret e Max/Min com potencial de aplicação para o monitoramento condição da agregação do solo em áreas em recuperação (Tabela 11).

**Tabela 11** - MANOVA morfometria de agregados e substratos e solo natural.

| <b>Substrato</b>      | <b>Nível 0</b> |          | <b>WP</b>   |          | <b>RS</b>   |          | <b>PL</b>   |          | <b>NATURAL</b> |          |
|-----------------------|----------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|----------------|----------|
| <b>Área</b>           | <b>-0.58</b>   | <b>a</b> | <b>0.10</b> | <b>b</b> | <b>0.11</b> | <b>b</b> | <b>0.17</b> | <b>c</b> | <b>0.28</b>    | <b>d</b> |
| <b>Circularidade</b>  | <b>-0.38</b>   | <b>a</b> | <b>0.09</b> | <b>b</b> | <b>0.16</b> | <b>c</b> | <b>0.17</b> | <b>c</b> | <b>0.29</b>    | <b>d</b> |
| <b>Diâmetro Feret</b> | <b>-0.64</b>   | <b>a</b> | <b>0.04</b> | <b>b</b> | <b>0.06</b> | <b>c</b> | <b>0.07</b> | <b>c</b> | <b>0.14</b>    | <b>d</b> |
| Min Feret             | -0.56          | a        | 0.01        | ab       | 0.07        | b        | 0.06        | b        | 0.08           | b        |
| Arredondamento        | -0.11          | a        | -0.03       | ab       | -0.01       | ab       | -0.01       | ab       | 0.01           | b        |
| <b>Max/Min</b>        | <b>-0.15</b>   | <b>a</b> | <b>0.04</b> | <b>b</b> | <b>0.05</b> | <b>b</b> | <b>0.10</b> | <b>c</b> | <b>0.16</b>    | <b>c</b> |

\* WP - Washing Plant, RS - Rejeito Seco, PL - Piso de Lavra, NATURAL: ecossistema de referência, conforme descrito no item 3.2.2. \*\*Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5%.

Segundo Fengler et al., (2017), às características relacionadas ao substrato do solo apresentam um aspecto essencial a ser considerado. De forma geral, as áreas localizadas em substrato piso de lavra (PL), substrato com maior teor de argila, como Mina 4, Mina 5 e Mina 6 tenderam a apresentar resultados mais próximos às áreas naturais, denotando um avanço na condição física com o estabelecimento da vegetação no processo de recuperação. Essa condição revelou-se como um fator condicionante no desenvolvimento da agregação do solo em áreas mineradas (Tabela 11). Enquanto as áreas em solos-substratos WP e rejeito seco (RS) possui predominância arenosa, assim observa-se que áreas de rejeitos

minerários apresentam maior dificuldade no desenvolvimento vegetal, o que pode explicar os resultados observados na diferenciação das demais áreas.

Em relação aos diâmetros dos agregados obtidos com diferentes peneiras, o resultado da MANOVA possibilitou a diferenciação morfométrica dos agregados do solo entre as peneiras com diâmetro: 0.71 e 1.0 mm (a), 2.0 mm (b), enquanto os agregados com diâmetro de 4.0 e 6.0 mm resultaram em semelhanças entre si e tenderam a valores maiores em comparação com os demais (c) (Tabela 12).

Conforme Tabela 12, não houve diferença para as variáveis morfométricas Min Feret e arredondamento em relação aos tamanhos dos agregados. Já as variáveis: Área, Circularidade, Feret e Max/Min foram consideradas significativas ( $p < 0,05$ ), destacaram-se pela diferenciação das demais variáveis em relação às interações parâmetros morfométricos e o diâmetro dos agregados. Acredita-se que áreas com atividades menos agressivas e sistemas com menor revolvimento do solo apresentem melhores valores para essas variáveis e posterior tendência significativa à circularidade do agregado (OLSZEWSKI et al., 2004; HICKMAN et. al., 2011).

**Tabela 12** - Resultados MANOVA para avaliar as diferenças entre as peneiras e os valores médios das variáveis morfométricas.

| Peneira   | 0.71 mm | 1.0 mm  | 2.0 mm   | 4.0 mm  | 6.0 mm   |
|-----------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Área      | 0.04 a  | 0.07 a  | 0.13 b   | 0.89 c  | 0.91 c   |
| Circular. | 0.03 a  | 0.08 a  | 0.13 b   | 0.87 c  | 0.89 c   |
| Feret     | 0.04 a  | 0.03 a  | 0.14 b   | 0.81 c  | 0.89 c   |
| MinFeret  | -0.44 a | 0.11 b  | 0.15 bc  | 0.19 bc | 0.20 c   |
| ARRED.    | -0.01 a | 0.03 b  | -0.05 ab | 0.23 c  | -0.05 ab |
| Max/Min   | -0.13 a | -0.15 a | 0.04 b   | 0.08 b  | 0.23 c   |

\* Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, não são significativamente diferentes pelo teste Tukey, a 5%.

Os menores agregados são mais resistentes à desagregação, pois são estabilizados por óxidos de Fe e de Al, enquanto os agregados maiores são mais sensíveis às práticas de manejo e se desagregam com maior facilidade, pois são estabilizados pela matéria orgânica. Apesar das diferenças entre os tamanhos de agregados, é evidente que cada estágio de agregação é independente e que há uma hierarquia em sua formação, pela qual os agregados maiores são formados por agregados menores (FAUSTINO, 2018).

## CONCLUSÃO

- ✓ Considerando os resultados da análise dos parâmetros morfométricos foi possível avaliar a condição do processo de agregação nas áreas mineradas.
- ✓ As áreas mais antigas em estágio avançado de recuperação (Mina 5 e 6) apresentaram condições morfométricas tendendo para formas mais circulares e arredondadas em relação as áreas mais jovens em estágio intermediário de recuperação, Mina 2, 3 e 4.
- ✓ Na análise morfométrica em relação à abertura das peneiras, observou-se que acima de 2 mm é possível uma melhor identificação das variáveis. Assim, as peneiras 2 e 4 mm podem ser utilizadas como padrão de diagnóstico para avaliar a condição do processo de agregação, uma vez que a peneira de 6 mm apresenta semelhança com a peneira de 4 mm.
- ✓ Dentro da análise multivariada de variância MANOVA, os parâmetros morfométricos: Área, Circularidade, Diâmetro de Feret e Max/Min, foram os que mais expressaram diferenças significativas, considerando idade de manejo e revegetação.
- ✓ A análise morfométrica possibilitou identificar os parâmetros que expressam melhor as mudanças da condição do agregado do solo, apresentando respostas positivas na diferenciação das áreas em processo de recuperação em relação ao ecossistema de referência, podendo ser um promissor indicador de qualidade física do solo minerado que expressa de forma significativa alterações ambientais.

## **4. CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DE AGREGADOS COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE DA QUALIDADE DE AGREGAÇÃO**

### **4.1. Introdução**

O estudo sobre a relação entre a forma de agregados e a qualidade do solo tem adquirido maior evidência na comunidade científica nos últimos anos. Diversos estudos têm associado um intrínseco relacionamento entre a diversidade de formas de agregados e a estruturação do solo (MARTÍNEZ et al., 2015; DE GRYZE et al., 2008; RIBEIRO et al., 2020), influenciando diretamente as características fundamentais para qualidade física, química e biológica do solo (MUNKHOLM, et al., 2016; GARBOUT et al., 2013).

Neste sentido, a análise de variabilidade pode ser uma ferramenta útil na avaliação da qualidade da agregação do solo, permitindo avançar no entendimento de como ações de manejo interferem no comportamento dos agregados antes, durante e após intervenção no solo.

O estudo da variabilidade da agregação refere-se à caracterização paramétrica da forma de agregados que compõem uma amostra de solo. A caracterização da variabilidade pode ser obtida pela representação gráfica da frequência estatística de um conjunto de dados. A variabilidade pode ser descrita também pela determinação de medidas de dispersão e medidas de tendência central, como por exemplo, a amplitude, a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação (BASTOS; DUQUIA, 2007). Desta forma, entende-se por controle de qualidade da agregação, o processo estatístico que monitora e avalia o comportamento de agregação utilizando amostra de solo coletados no campo (PECHE FILHO, 2018).

O comportamento variável da agregação pode ser analisado em três diferentes maneiras: 1) Variabilidade de agregação natural, ou seja, nas condições de referência (pré-analítica); 2) Variabilidade de agregação real, sendo essa, nas condições atuais das análises (analítica) e por fim, 3) Variabilidade de agregação manejada (pós-analítica).

Segundo Peche Filho (2018), o solo possui diferentes tipos de agregados que apresentam constantes oscilações de seus níveis de variação que podem afetar a interpretação dos dados. As fontes de variação podem ser assim caracterizadas:

1. Variabilidade natural: fatores naturais que podem influenciar a magnitude da variação dos agregados: minerais, agentes cimentantes e biogênese.
2. Variabilidade negativa: variações que podem afetar as condições naturais pelo impacto provocando desagregação resultando na geração de muitos agregados finos.
3. Variabilidade positiva: variações que podem afetar as condições naturais pelo impacto provocando agregação e diminuição de muitos finos.

A gestão das condições de agregação do solo pode contribuir para processos agrícolas mais regenerativos (RIBEIRO et al., 2020), utilizando plano de manejo com base na caracterização da variabilidade de agregação. Além disso, identificar e quantificar as fontes de variabilidade pode garantir a continuidade do processo de agregação positiva, tão importante para manter as condições produtivas do solo.

Sendo assim, as variáveis pré-analíticas devem ser controladas de forma a preservar a representatividade e a integridade do processo de agregação natural, minimizando a desagregação, resultando na obtenção de resultados produtivos sustentáveis. A análise da variabilidade é ótima ferramenta para auxiliar os gestores ambientais na redução da variabilidade negativa da agregação relacionada ao impacto do uso e ocupação do solo (PECHE FILHO, 2018).

Estudos sobre a condição de agregação de solos degradados são ainda muito escassos (RIBEIRO et al., 2020), neste contexto, esse capítulo busca avançar no conhecimento a respeito da caracterização da variabilidade de forma do agregado do solo degradado por mineração na Amazônia brasileira (RO). O solo amostrado foi submetido ao processo de recuperação ambiental, visando a restauração florestal. Por meio de medidas de diâmetro de Feret avaliou-se o comportamento da variabilidade da agregação de solo em 6 minas desativadas em recuperação e ecossistema de referência a partir da proposta de caracterização da variabilidade morfométrica de Peche Filho (2018).

## **4.2. METODOLOGIA**

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional do Jamari – RO, a descrição detalhada da área pode ser encontrada no capítulo III, assim como procedimento metodológico para o peneiramento do solo e processamento das imagens dos agregados, realizados preliminarmente à análise de variabilidade.

### **4.2.1. Diretrizes para análise dos dados**

O conjunto de dados morfométricos foi processado no image J (EMBRAPA, 2017), em seguida com base nas medidas de Feret foram realizadas as seguintes análises:

- a. Análise estatística descritiva, determinando medidas de tendência central e medidas de dispersão;
- b. Análise gráfica, determinação da variabilidade ao acaso e da variabilidade hierarquizada;
- c. Análise de tendências na dispersão dos dados pela média móvel simples;
- d. Análise de Frequência;

### **4.2.2. A análise gráfica do comportamento de dados**

Vários autores definem o conceito e os objetivos da análise gráfica, no entanto, a que podemos adaptar para melhor aplicação nos estudos de agregação é aquela que procura interpretar o comportamento atual do conjunto de dados, a fim de tentar identificar quais são, ou quais serão, as tendências (forças) predominantes. Desta forma, podemos dizer que a análise gráfica estuda a evolução dos dados ao longo do tempo relacionando com informações relevantes que possam justificar o comportamento gráfico (IDOETA, 2009 apud PECHE FILHO, 2018).

A análise gráfica também poder ser utilizada com base em cartas de controle de qualidade para estudar indicadores de ambiente, permitindo detectar, precocemente, mudanças no processo, além de serem capazes de identificar mudanças de menor magnitude (ZANINI et.al 2016).

### 4.2.3. Análise da variabilidade de forma do agregado

Para estudo da variabilidade de forma, empregou-se a relação entre o MAX/MIN (maior e menor diâmetro), tomando a partir das medidas Feret de cada agregado (Equação 5). Essas medidas são comumente utilizadas para o estudo de partículas irregulares, pois representam o diâmetro que cruza o centro de determinado objeto tomando alguma direção arbitrária (Wang et al., 2014). Em geral, a determinação do Feret é realizada a cada 10°, totalizando 36 medidas. Optou-se pela utilização apenas da relação entre o maior e menor diâmetro, de maneira a verificar o grau de desvio dos agregados em relação a um círculo perfeito.

$$(Equação 5) \quad Dr = \frac{Dmín}{Dmáx}$$

Onde  $Dr$  é o índice que expressa a forma do agregado no intervalo entre 0 e 1. O valor 1 está associado a valores idênticos nos diâmetros do agregado, assumindo a forma de um círculo perfeito. O valor 0,5 representa uma diferença de 50% entre o menor ( $Dmín$ ) e maior ( $Dmáx$ ) diâmetros, assumindo a forma angular; e valores próximos a 0 diferenças máximas entre os diâmetros, assumindo a forma prismática.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1. Análise Estatística Descritiva

A obtenção de dados descritivos tem como objetivo caracterizar numericamente a variabilidade ocorrente. Um comparativo das medidas de tendência central, moda, média e mediana vão indicar tendências no comportamento dos dados. As diferenças entre a mediana e a média, bem como as medidas dos quartis, podem indicar distorções das distribuições de frequência (PECHE FILHO, 2018).

Na Tabela 13, são apresentadas as medidas descritivas da relação entre o diâmetro máximo e mínimo de Feret. Segundo Peche Filho (2018), tais medidas de Max/Min permitem observar quando ocorrem deformações nos agregados do solo e podem indicar a forma arredondada, pois valores próximos de 1 representam forma circular perfeita. Diferenças entre a mediana e a média, bem como as medidas dos quartis, podem indicar distorções das distribuições de frequência. Neste caso, observaram-se poucas diferenças entre a média, variando entre 0.67 e 0.79, já a mediana apresentou variação entre 0.68 e 0.78, sendo as áreas mais antigas ligeiramente superiores às áreas mais jovens. A medida do primeiro quartil (Q1) apresentou-se superior a 0.59, confirmando as tendências esperada com resultado convergente para um grau de arredondamento elevado nas amostras.

**Tabela 13.** Análise estatística descritiva do Max/Min (%) do diâmetro de Feret.

| Estatística                | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata  |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|
| No. de observações         | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    | 100    | 100      | 100   |
| Mínimo                     | 0.41   | 0.55   | 0.44   | 0.52   | 0.50   | 0.42   | 0.30     | 0.38  |
| Máximo                     | 0.82   | 0.90   | 0.90   | 0.91   | 0.87   | 0.90   | 0.96     | 0.94  |
| 1° Quartil                 | 0.59   | 0.69   | 0.66   | 0.71   | 0.68   | 0.68   | 0.68     | 0.70  |
| Mediana                    | 0.68   | 0.75   | 0.70   | 0.78   | 0.75   | 0.74   | 0.78     | 0.77  |
| Média                      | 0.67   | 0.74   | 0.71   | 0.76   | 0.73   | 0.73   | 0.79     | 0.78  |
| Amplitude                  | 0.55   | 0.39   | 0.46   | 0.40   | 0.48   | 0.47   | 0.45     | 0.46  |
| 3° Quartil                 | 0.75   | 0.82   | 0.79   | 0.83   | 0.80   | 0.80   | 0.82     | 0.80  |
| Variância (n-1)            | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01     | 0.01  |
| Desvio Padrão (n-1)        | 0.12   | 0.09   | 0.09   | 0.10   | 0.09   | 0.09   | 0.10     | 0.09  |
| Coefficiente de Variação   | 0.18   | 0.14   | 0.13   | 0.12   | 0.11   | 0.12   | 0.12     | 0.11  |
| Coefficiente de Assimetria | -0.59  | -0.35  | -0.34  | -0.62  | -0.69  | -0.82  | -0.99    | -1.05 |
| Curtose                    | -0.51  | -0.82  | 0.08   | 0.20   | 0.12   | 1.09   | 1.34     | 1.16  |

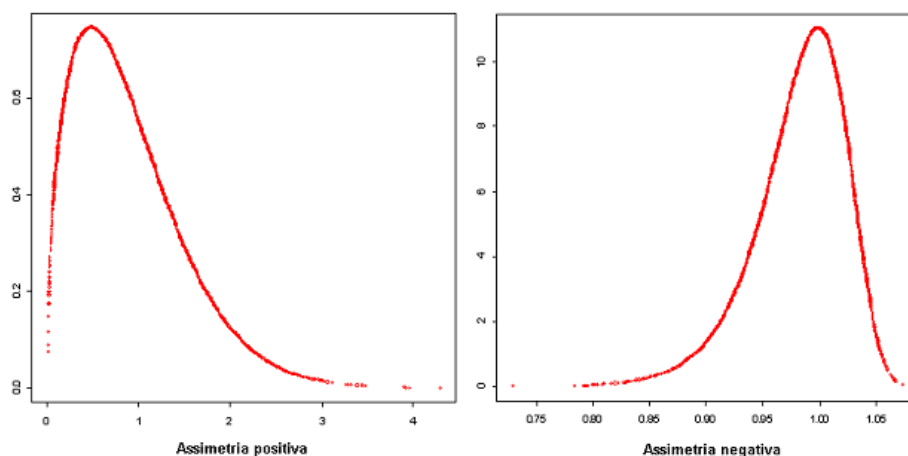
\* Dados correspondente à 100 amostras de agregados analisadas no software ImageJ®.

A amplitude total explica a variabilidade de forma, considerando que quando tem uma elevada amplitude há uma elevada variabilidade, neste caso observamos amplitude mediana nas amostras com pouca variação da forma nas Minas em recuperação, com variação da amplitude de diâmetros entre 0.39 e 0.55, média próxima a 0.45. (Tabela 13).

O coeficiente de variação também permite perceber a condição de agregação em função a uma tendência de forma. Valores superiores a 20% podem indicar que a amostra apresenta uma agregação instável, tendendo, ou não, para os extremos (arredondado ou prismático). Neste caso, nenhuma das áreas apresentou tal condição de agregação instável.

De acordo com Peche Filho (2017), quando a assimetria é positiva, a moda está posicionada abaixo da média, portanto, é possível afirmar que há uma tendência de desvio de forma na amostra (Figura 6). Por outro lado, quando a assimetria é negativa, a moda está posicionada acima da média, sendo possível afirmar que há uma tendência de arredondamento do conjunto de agregados. Na Tabela 13 é possível observar o comportamento da amostra que é predominado por assimetrias negativas, portanto, indicando uma tendência de arredondamento no conjunto das formas dos agregados do solo. pois todas as áreas demonstraram assimetria negativa, indicando que os valores são distribuídos relativamente de forma diferente tendendo para o lado direito.

Figura 6: Imagem da Curva do coeficiente de assimetria



Fonte: Portal Action

O coeficiente de curtose é uma medida de dispersão que caracteriza o "achatamento" da curva da função de distribuição. A curtose confirma a classificação

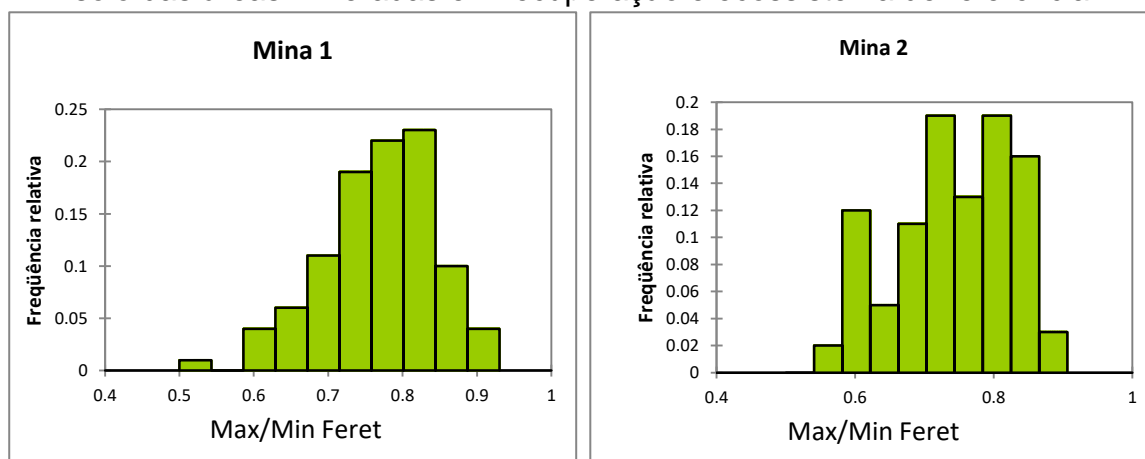
dos agregados sob influência do parâmetro médio, indicando uma estabilidade do processo de agregação, seja ele positivo ou negativo. Quando valores da curtose são positivos como nas áreas denominadas Minas 3, 4, 5, 6, capoeira e Mata, a média representa efetivamente o estado de agregação significativo da amostra. Quando valores são negativos, como nas Minas 1 e 2 a variabilidade de forma é alta e a forma média é pouco representativa (Tabela 13).

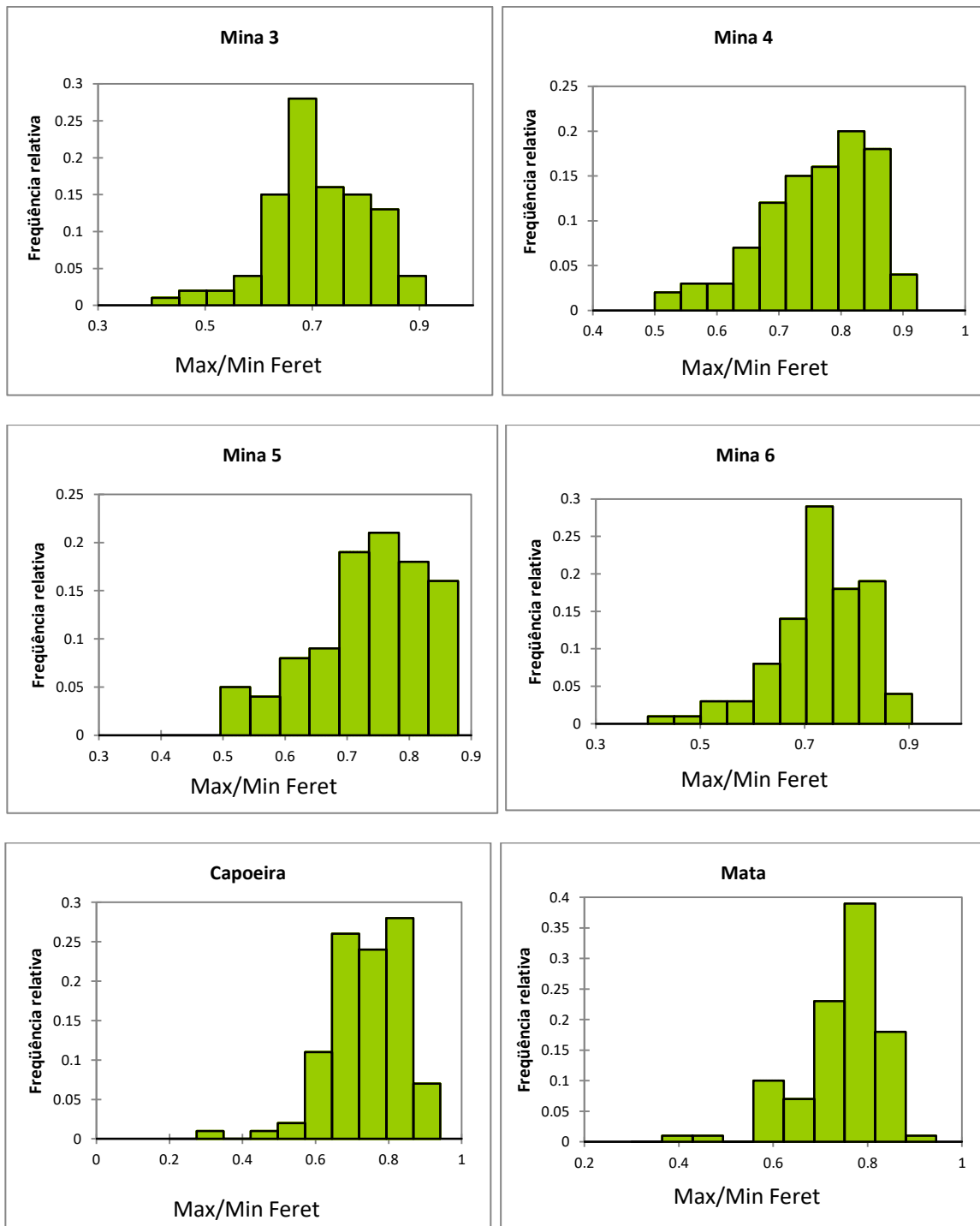
#### 4.3.2. Análise de Frequência: Histogramas

A análise de frequência e o estudo dos histogramas dos dados geraram imagens gráficas que interpretadas podem caracterizar o processo de agregação do solo. O primeiro passo é determinar a escala de arredondamento, ou seja, o arredondamento cresce para a direita, enquanto as formas indesejáveis, vão ocorrer com tendência à esquerda.

A Figura 7 mostra a distribuição de agregação nas áreas mineradas, como a frequência de dados promove um deslocamento gráfico para a direita, ocorre predominância de formas arredondadas ou circulares nas amostras. Nos histogramas de frequência para a relação entre o diâmetro máximo e mínimo dos agregados do solo de cada Mina em recuperação e ecossistema de referência, nota se que 80% da frequência relativa encontra-se entre 0.60 e 0.90 em todas às minas.

**Figura 7.** Histograma de frequência da relação entre o Max/Min dos agregados do solo das áreas mnieradas em recuperação e ecossistema de referência.



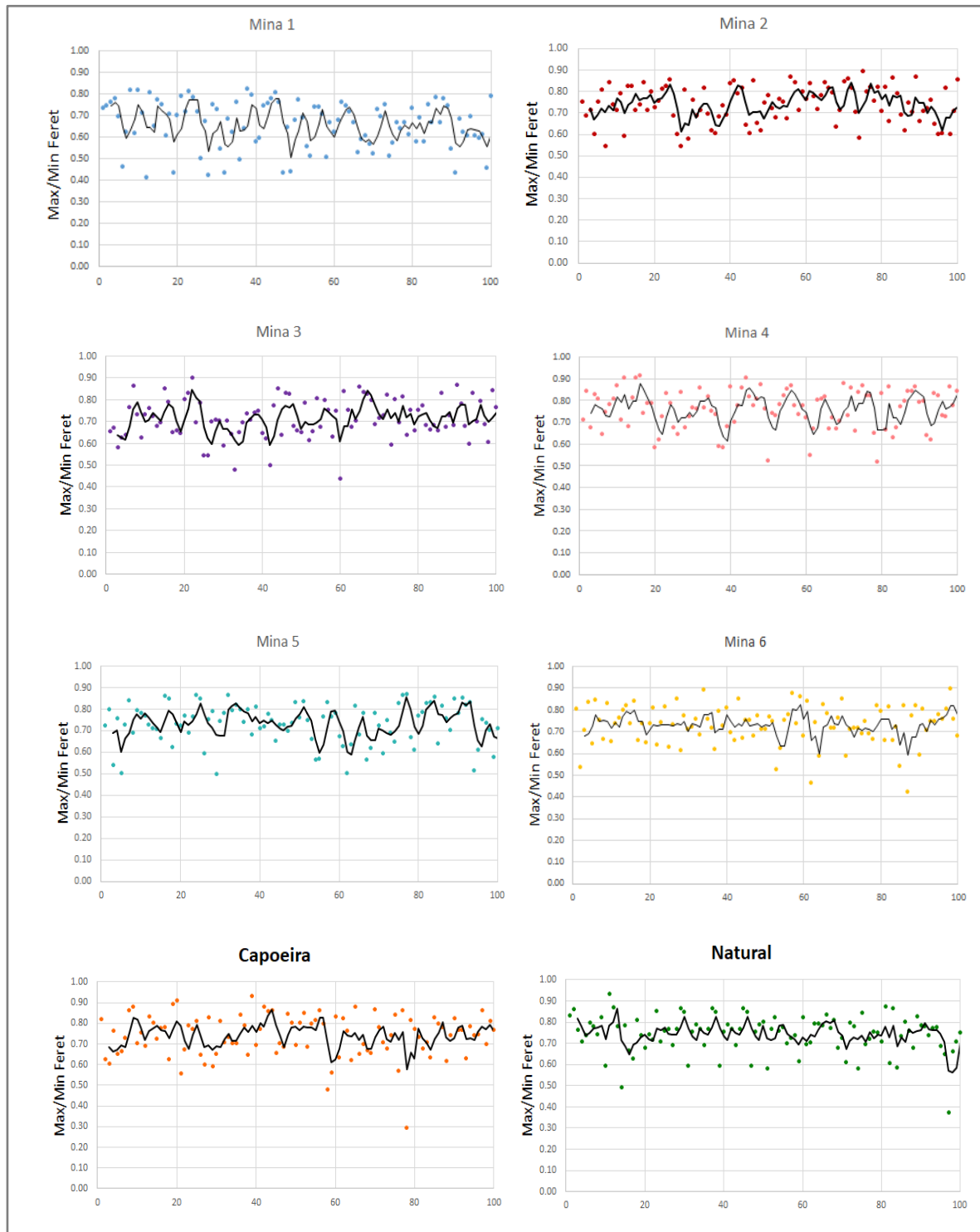


#### 4.3.3. Carta de controle: variabilidade ao acaso

O diagrama da Figura 8 expressa a variabilidade ao acaso, uma ferramenta de análise que busca entender graficamente como ocorre a variabilidade da amostra. A condição em que os resultados se apresentam permite obter uma imagem gráfica da variabilidade, possibilitando reconhecer diferenças cruciais entre condições de agregação. As imagens com picos próximos e regulares indicam baixa

variação; imagens com picos distantes e alternados indicam elevada variação do conjunto de formas. A distribuição ao acaso pode ocorrer com diferentes combinações na imagem gráfica e a amplitude gráfica expressa o diâmetro máximo dos agregados retidos na peneira de referência.

**Figura 8.** Carta de variabilidade ao acaso para os diâmetros Max/Min dos agregados de solos minerados em recuperação e ecossistema de referência.

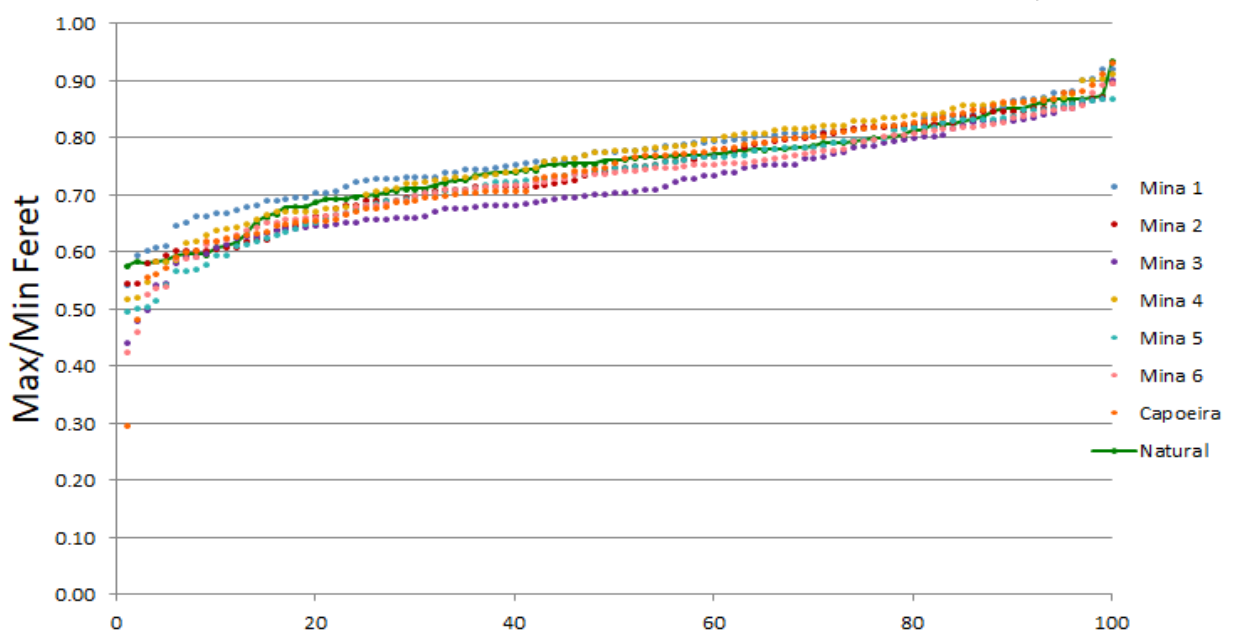


Na Figura 8 é possível destacar visualmente a forma alternada em que os picos máximos ocorrem nas Minas 1, 2, 3, 4 e 5. A impressão visual da imagem de variabilidade permite caracterizar o comportamento das diferentes formas ocorrentes na amostra. Assim, podemos comprovar que esta amostra apresenta a variabilidade de formas em três classes: sub-angular, arredondado e redondo. Também nestas imagens é possível notar maior frequência de picos mínimos e relativa concentração de intervalos próximos na Mina 6, no ecossistema de referência denominada Capoeira e Mata, demonstram que há uma tendência de predominância nas amostras arredondadas e redondas, sendo essas mais próximas da forma de agregados mais arredondados.

#### 4.3.4. Carta de controle: variabilidade hierarquizada

A Figura 9 mostra a imagem dos dados hierarquizados do menor para o maior. Esta imagem gráfica permite uma plotagem indicando a linha separatriz para as classes de formato. Em comparação com a carta de variabilidade ao acaso, essa ferramenta de análise possibilita uma melhor visualização, ordenada, de onde os quintis ocorrem, facilitando o processo de classificação e o entendimento da variabilidade ocorrente. Ambas as amostras apresentaram comportamento similar, com mínimas diferenças.

**Figura 9.** Carta de dados hierarquizados para as relações entre os diâmetros máximos e mínimo ecossistema de referência e minas em recuperação.



A Figura 9 mostra o comportamento dos dados totais hierarquizados e a amplitude de concentração das classes. Considerando o modelo de estratificação em classe, proposto por Peche Filho (2018), é possível dividir observar tendências da forma por meio da classificação média total em intervalos de classes, atribuindo 5 classes de forma diferentes valores médios de Max/Min, sendo: 1) Classe de agregados prismáticos, de 0 a 0.2; 2) Classe de agregados angulares, de 0.2 a 0.4; 3) Classe de agregados sub-angulares, de 0.4 a 0.6; 4) Classe de agregados arredondados, de 0.6 a 0.8 e 5) Classe de agregados redondos, de 0.8 a 1.0.

Neste sentido, é possível observa-se que nas oito áreas 75% dos dados totais (100 agregados) estão posicionados na classe arredondado (entre 0,6 e 0,8), 15% estão posicionados na classe sub-angular (entre 0,4 e 0,6), e apenas 10% na classe redondo (acima de 0,9) e nenhum agregado prismáticos. Essa distribuição permite afirmar que o processo de agregação encontra-se ativo com consistência (Fig. 9).


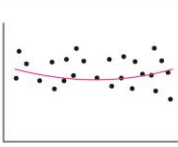
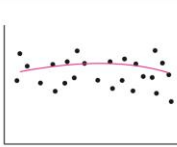
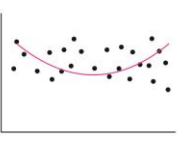
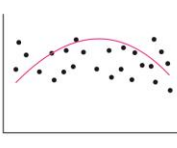
Observa-se também maior variabilidade dos dados na região do início da linha de ordenação representada pelos agregados na classe sub-angular (entre 0.40 e 0.06), enquanto no final quanto mais à forma do agregado se aproxima do arredondamento (1.00) menor é a variabilidade.

#### **4.3.5. Análise de Tendência na Dispersão**

A análise de tendência e normalidade dos dados gera imagens gráficas que interpretadas podem caracterizar o processo de agregação do solo. O primeiro passo é determinar se o equilíbrio da distribuição da variabilidade agregada ocorre de forma normal, ou anormal. No caso de não haver normalidade significa que não existe um processo de agregação em evidência.

Para determinar a condição de equilíbrio de agregação em amostras de solo, recomenda-se a análise das linhas de tendências da carta de variabilidade ao acaso, tomando o conjunto de padrões da figura 10 como referência para a qualificação da amostra.

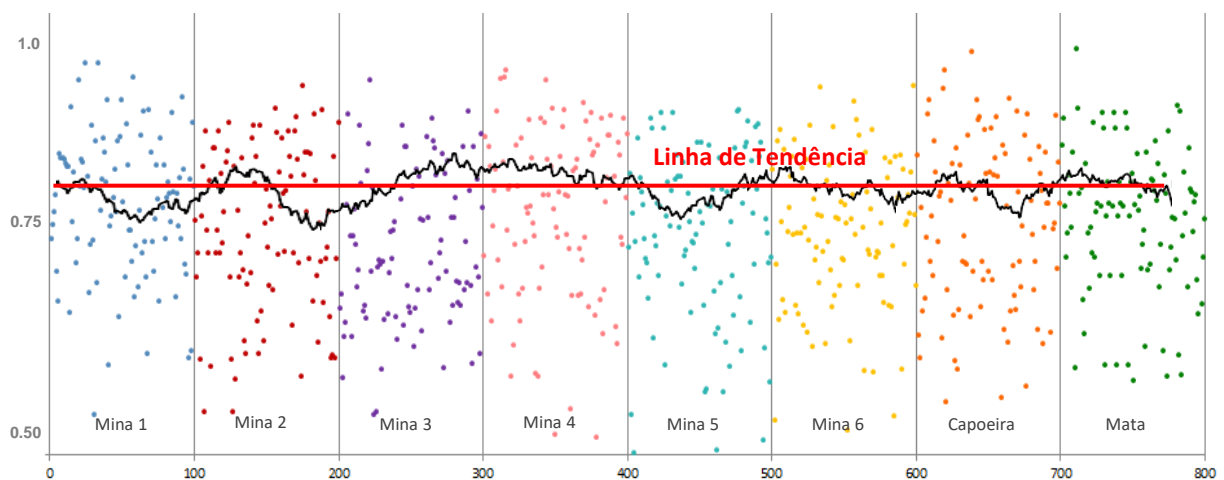
**Figura 10.** Padrão gráfico para qualificação do equilíbrio nas amostras de solo.

| Qualificação da amostra | Critério  | Padrão gráfico   |    |   |
|-------------------------|---|--|----|---|
| Em equilíbrio           | Linha de tendência linear (tomando modelo de ajuste polinomial de segundo grau)           |  |    |   |
| Próxima ao equilíbrio   | Linha de tendência próxima a linear (tomando modelo de ajuste polinomial de segundo grau) |   | ou |  |
| Desequilibrada          | Linha de tendência quadrática (tomando modelo de ajuste polinomial de segundo grau)       |   | ou |  |

Fonte: Peche Filho, 2018

Portanto, considerando as amostras da Figura 11, observamos comportamento de linha quase linear, próxima ao equilíbrio, com tendência de variabilidade similar nos agregados das minas 4, 6 e Mata, com algumas diferenças entre si. Desta forma, a linha de tendência indica um comportamento de agregação bem controlado e um processo de agregação com tendência de produzir mais estruturas arredondadas, com tendências de picos menores voltados para a separatriz superior.

**Figura 11.** Análise de Tendência na Dispersão e tendência da variabilidade



A composição de formas dos agregados presentes em uma amostra de tendência pode ser representada graficamente por um comportamento de tendências. No caso da representação por variabilidade do parâmetro que relaciona a razão do comprimento pico maior e menor. Com a análise dos picos formados pelas linhas da média móvel, bem como sua frequência é possível caracterizar a tendência da variabilidade. A frequência de picos é maior nas Minas 2, 3, 5 e capoeira, indicando a existência de variações apenas em algumas Minas apresentando uma maior variabilidade de forma.

De uma maneira geral a análise de uma linha de tendência pode demonstrar o comportamento da agregação nas diferentes minas. Com base no comportamento da linha linear na Figura 11, podemos notar que a variabilidade ocorre de forma diferenciada nos diferentes tratamentos de solo. Na amostra de ecossistema de referência (Mata) a variabilidade exerce uma influência que conduz a uma agregação de caráter mais arredondado, sem nenhuma variação de causa especial, assim como na capoeira, Mina 4 e 6. Já na Mina 1, 2, 3 e 5, a variabilidade exerce uma influência conduzindo a agregação com caráter mais variável, apresentando algumas variações de causas especiais.

#### 4.4. CONCLUSÕES

- ✓ A análise da variabilidade da variável Max/Min possibilitou várias interpretações para o entendimento da condição da agregação em amostras de solo minerado.
- ✓ O estudo de tendência e normalidade da dispersão dos dados analisou a consistência e o equilíbrio da variabilidade, permitindo qualificar de forma prática a agregação do solo e informar à condição de estabilidade do processo de agregação, demonstrando melhores condições de agregação nas áreas denominadas Mina 4, 6, Capoeira e Mata.
- ✓ A aplicação da análise de variabilidade nas amostras de solo minerado em processo de recuperação permitiu afirmar que o processo de agregação encontra-se ativo com consistência, pois a maior parte dos dados encontram-se nas classes arredondado e redondo.
- ✓ As atividades comprovam a caracterização da variabilidade morfométrica de agregados como potencial ferramenta para auxiliar na tomada de decisão a ser utilizada como estratégia de gestão ambiental, visando à melhoria da condição da agregação e formas de manejo de solos degradados por mineração.

## **5. RELAÇÃO DA ANÁLISE MORFOMÉTRICA DOS AGREGADOS SOLO E TEOR DE GLOMALINA**

### **5.1. Introdução**

Áreas degradadas em processo de recuperação precisam ser avaliadas e monitoradas por meio de indicadores de qualidade ambiental a fim de descrever a real condição do ecossistema. No entanto, nenhum indicador sozinho conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos da qualidade do solo, por ser ela influenciada por diversos fatores químicos, físicos e biológicos. Desta forma, deve haver relação direta entre o conceito de qualidade e os atributos do solo que justifiquem sua escolha como indicador qualitativo (FAUSTINO, 2018), pois diversos parâmetros podem ser usados como indicador de qualidade do solo. Por tanto, a escolha do método e dos parâmetros dependem exclusivamente dos objetivos da pesquisa, recursos disponíveis, condições do contexto local e das características peculiares do solo.

Estudos sobre restauração ecológica realizados em áreas mineradas em recuperação na Amazônia Brasileira demonstram a importância da relação entre as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo com o grau de desenvolvimento florestal e na avaliação da qualidade ecossistêmica (LONGO et al, 2011; RIBEIRO et al, 2016; YADA et al, 2016, FENGLER, 2018, CARVALHO et al., 2019). Neste contexto, outro fator fundamental na avaliação da qualidade do solo é a análise de atividade microbiológica associada à formação dos agregados.

A relação existente entre a agregação e atividade biológica tem sido evidenciada em diversos grupos de pesquisa, sendo, a presença de macroagregados atribuída à matéria orgânica, que age como substrato para o desenvolvimento da comunidade microbiológica no solo. A presença de uma carga microbiana elevada influencia fortemente na qualidade e estabilidade dos agregados (TROEH; THOMPSON; 2007; TRUBER; FERNANDES 2014; LUNA et al., 2016).

Deste modo, serão discutidas nesse capítulo as propriedades microbiológicas relacionadas à quantificação de glomalina e sua relação com as propriedades físicas relacionadas à qualificação morfométricas dos agregados, objetivando avaliar a aplicabilidade do método no monitoramento de áreas degradadas pela mineração no processo de recuperação.

### **5.1.1. Indicadores Microbiológicos de Recuperação de Áreas Degradadas**

Grande parte da biodiversidade do ecossistema encontra-se vivendo em uma estrutura complexa do solo. A função que a biota do solo desempenha tem efeitos diretos e indiretos no crescimento vegetal e na qualidade dos serviços ecossistêmicos, como decomposição de microorganismos e restos vegetais, incorporação da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, controle populacional e transferência de água. Além disso, podem ser usados como bioindicadores no monitoramento ambiental, devido à sensibilidade às alterações da qualidade do ecossistema (DORAN; PARKING, 1994; DINIZ, 2011).

A condição do habitat como espaços dos poros no solo, é determinada não apenas pela natureza química dos componentes orgânicos e minerais, mas também pela atividade biológica das raízes, fauna e manejo do solo. Junto com a ação do clima, a atividade dos organismos provoca a movimentação dos materiais orgânicos e inorgânicos no perfil do solo, contribuindo para formação estrutural do solo (YOUNG; CRAWFORD, 2004; DINIZ, 2011).

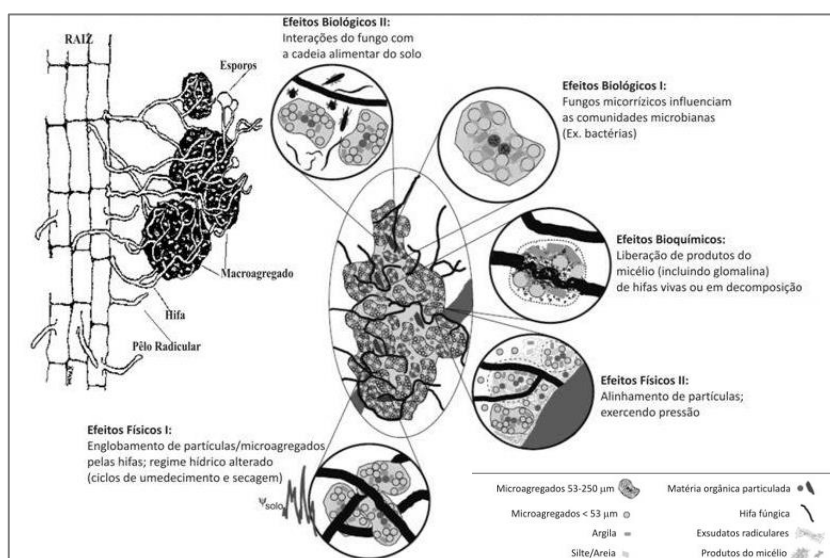
Dentre a biota ativa no solo estão os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), organismos biotróficos mutualistas simbiotes que vivem em associação com as raízes da maioria das plantas terrestres superiores. São essenciais para o sistema solo-planta por causa de sua influência na fertilidade do solo e nutrição vegetal (SOUZA et al., 2010; SILVA et al, 2016), devido aos efeitos benéficos proporcionados às plantas hospedeiras, como o seu melhor desenvolvimento, que é atribuído à maior capacidade de absorção de nutrientes do solo (TRUBER, 2013). Além disso, formam uma parcela significativa da biomassa microbiana no solo, representando mais de 90% da atividade biológica no solo (SIDDIQUI; PICHTEL, DINIZ, 2011).

Os serviços prestados pelos FMAs possuem papel importante na manutenção da biodiversidade, produtividade dos ecossistemas vegetais terrestres e qualidade do solo (SILVA et al, 2016), além de determinar o padrão de sucessão de uma comunidade vegetal (STÜRMER; SIQUEIRA, 2011, CARNEIRO et al, 2012), e aumentar a agregação e estabilidade do solo através da ação combinada de hifas

extraradical. Essa associação tem papel chave na manutenção do funcionamento dos ecossistemas naturais e na sustentabilidade dos agrossistemas.

A função das hifas dos FMAs é muito importante, pois o solo estruturado facilita a mobilização dos nutrientes, retenção de água e penetração de raízes, enquanto reduz a erosão. Além disso, os agregados fornecem um habitat favorável e protegido para microorganismos do solo e facilita a oxigenação das raízes. A ação das hifas no solo forma uma rede agregada que produz uma glicoproteína insolúvel chamada glomalina, conforme figura 12 (WRIGHT; UPADHYAYA, 1996; PURIN, 2005; LUNA et al, 2016).

Figura 12 – Estrutura e contribuição dos fungos micorrízicos no solo.



FONTE: Modificado de Rillig (2006).

A Glomalina é uma glicoproteína hidrofóbica e imunorreativa, componente da parede das hifas dos FMAs, que se acumulam no solo após o processo de decomposição das hifas por microrganismos edáficos (RILLIG, 2007, TRUBER, 2013). A repelência a água influencia na proteção contra a erosão dos solos, por isso essa glicoproteína pode contribuir para a estabilidade estrutural dos solos. De acordo com Rillig (2003), a glomalina induz ligações com partículas de argila aumentando a estabilidade de microagregados do solo, contribuindo, assim, para a recuperação física do solo.

A descoberta da glomalina foi relatada por Wright et al. (1996), que observaram a atuação dessa proteína, proporcionando agregação ao solo e

estabilidade dos agregados, pois atua como um agente ligante orgânico, no processo de cimentação das partículas, criando um selamento entre elas. Acredita-se que sua função primordial é auxiliar na proteção das hifas fúngicas contra a dessecação, sendo liberadas no solo quando as hifas perdem a capacidade de transportar nutrientes para o hospedeiro, a partir daí contribuindo na agregação das partículas minerais e orgânicas presentes no solo (RILLIG, 2007, TRUBER, 2013).

Para Rillig, Maestre e Lamit (2003), em função de seus benefícios para o solo e para o meio ambiente, é importante aumentar o teor de glomalina no solo, o que pode ser feito por meio de práticas conservacionistas que beneficiem o estabelecimento da micorríza arbuscular, aumentando a resistência no solo (RILLIG et al., 2003 RILLIG et al., 2007). A glomalina além de ser insolúvel em água, pode ser extraída em altas temperaturas, isso sugere que ela seja uma molécula extremamente estável (WRIGHT; UPADHYAYA, 1998).

A glomalina facilmente extraível (GFE) representa o material formado recentemente no solo, além disso, é mais susceptível a atividades de decomposição, por estar concentrada predominantemente na superfície dos agregados. Por outro lado, a glomalina total (GT) representa a quantidade total de proteína no solo, tanto na superfície como no interior dos agregados. As duas frações de glomalina, tanto a facilmente extraível (GFE), quanto à glomalina total (GT), podem ser determinadas por métodos bioquímicos (WRIGHT; UPADHYAYA, 1998). No entanto, a metodologia utilizada não é exclusiva pra extração da glomalina, deste modo, o valor total da quantificação pode ter interferências de outras proteínas resistentes ao método. A quantificação da glomalina pode ser um parâmetro representativo das mudanças causadas pelo uso do solo, podendo se tornar um bom indicador de recuperação por atender integralmente os fatores e por ser correlacionada com importantes atributos do solo (RILLIG; MAESTRE; LAMIT, 2003; TRUBER, 2013; KUMAR et al, 2019, SARAPAKTA et al, 2019).

Segundo Wright e Upadhyaya (1998) existem algumas estimativas de que a produção de glomalina pode variar de 1-60 mg g<sup>-1</sup> solo. Em áreas revegetadas com plantas micorrizadas, a produção pode chegar a 3,65 mg g<sup>-1</sup> solo (CARAVACA et al., 2006). De acordo com Rillig et al. (2003), em áreas agrícolas os valores de glomalina facilmente extraível e total ficam em torno de 0,5 e 3 mg g<sup>-1</sup> solo, respectivamente.

Já quando observados valores de glomalina em solos de floresta, Rillig et al. (2001) conseguiram extrair  $> 60 \text{ mg g}^{-1}$  solo. Os principais fatores que estão envolvidos no controle da produção de glomalina no solo ainda não são claros, contudo, a combinação de concentração de nutrientes, clima, tipo do hospedeiro e diversidade de FMAs influencia a deposição dessas proteínas no solo (RILLIG et al., 2001).

Assim, reconhecer atributos das comunidades nativas de FMAs como indicadores de impacto tanto ambiental quanto de práticas conservacionistas do solo, permitirão inferir mais eficientemente sobre a sua diversidade funcional, utilizá-los como instrumento de medida da qualidade do solo e viabilizar a sua aplicabilidade como um insumo biotecnológico, sobretudo na recuperação de áreas degradadas com potencial para exploração sustentável. No entanto, escassas e inconsistentes ainda são as pesquisas sobre a microbiota do solo, em especial aquelas que visam interpretar suas interações bióticas e abióticas (PURIN, RILLIG, 2007), mediante aos parâmetros chamados indicadores ecológicos (MELLONI et al., 2006, TRUBER, 2014).

A aplicabilidade da glomalina como indicador de qualidade do solo tem sido evidenciada principalmente em área agrícolas, melhorando a produtividade de forma sustentável (SARAPAKTA et al., 2019), em áreas de ecossistema florestal contribuindo para desenvolvimento de vegetação (VASCOCENLOS et al, 2016), em áreas degradadas (REYES et al., 2018; LIU et al, 2020) e também em área minerada em processo de recuperação, possibilitam melhorias em vários níveis nas características do solo (LUNA et al., 2016; KUMAR et al., 2018). Sua grande vantagem como indicador de qualidade ambiental está na forte relação com variáveis físico-químicas, além ter participação direta nos processos biológicos do solo (PURIN; RILLING, 2007; KUMAR et al,2019).

Nesse contexto, a presente proposta busca desenvolver e testar uma abordagem para qualificação da agregação de ambientes em recuperação ambiental, por meio da relação da morfometria dos agregados e quantificação do teor de glomalina em um estudo de caso de áreas degradadas pela mineração em diferentes estágios de recuperação localizadas na Amazônia Brasileira, visando investigar as interações bióticas e abióticas do solo como potencial indicador ambiental.

## METODOLOGIA

### 5.1.1. Área em estudo e principais características dos locais

A Floresta Nacional do Jamari (FLONA do Jamari) está situada a 90 km da cidade de Porto Velho – RO e possui área total de aproximadamente 225.000 ha, dos quais 90% estão cobertas por Floresta Tropical Aberta. Nesta região são encontradas espécies de alto valor comercial para exploração de madeira e reservas minerais (LONGO et al., 2011).

As diferentes atividades e processos envolvidos na mineração de cassiterita que ocorrem no interior da FLONA desde a década de 70 resultam em características estruturais do solo que decorrem do tipo e da composição da rocha matriz, dos processos de degradação, do tempo de exposição do material remanescente e tipo de manejo realizado ao longo do tempo. Dessa forma, torna-se necessário uma caracterização área experimental em relação ao substrato, classe textural do solo, idade de intervenção e nível de desenvolvimento (Tabela 14).

**Tabela 14 - Descrição geral da Área**

| Mina            | Área                | Idade | Substrato            | Classe Textural | Estágio               |
|-----------------|---------------------|-------|----------------------|-----------------|-----------------------|
| <b>Mina 1</b>   | Nível 0 de RAD      | 0     | Mina Céu aberta      | Siltílica       | Zero                  |
| <b>Mina 2</b>   | Duduca A3           | 10    | Washing Plating (WP) | Arenosa         | Intermediário         |
| <b>Mina 3</b>   | 14 de Abril A5      | 12    | Rejeito Seco (RS)    | Arenosa         | Intermediário         |
| <b>Mina 4</b>   | Santa Maria 6       | 15    | Piso de Lavra (PL)   | Argilosa        | Intermediário         |
| <b>Mina 5</b>   | Serra da Onça A8    | 20    | Piso de Lavra (PL)   | Argilosa        | Avançado              |
| <b>Mina 6</b>   | Cacimba A1          | 30    | Piso de Lavra (PL)   | Argilo arenosa  | Avançado              |
| <b>Capoeira</b> | Recuperação Natural | 50    | Natural              | Argilosa        | Sistema de Referencia |
| <b>Mata</b>     | Floresta Natural    | <100  | Natural              | Argilosa        | Natural               |

### 5.1.2. Extração da glomalina

A extração da proteína do solo relacionada à glomalina (PRSG), frações denominadas glomalina total (GT) e glomalina facilmente extraível (GFE), foi realizada pelo método de BRADFORD (1976) modificada por WRIGHT & UPADHYAIA (1998). Para a extração utilizou se amostras de 1 g de solo seco depositadas em tubos Falcon de 50 ml. Na extração de GFE foram adicionados 8 ml de solução extratora de citrato de sódio 20 mM a pH 7,0.

As amostras foram homogeneizadas em vórtex, autoclavadas à 121° C por 30 minutos e em seguida centrifugadas a 7350g (5000rpm) por 15 minutos. O extrato sobrenadante foi cuidadosamente recolhido, medido com auxílio de pipeta e conservado em geladeira até a quantificação. A extração de GT foi realizada com citrato de sódio 50 mM, pH 8,0 e a autoclavagem à 121° C por 60 minutos, com diversos ciclos de autoclavagem e centrifugação até a remoção completa de toda proteína da amostra, ou seja até atingir a cor amarelo claro.

Para a quantificação de glomalina, seguiu-se o método BRADFORD (1976) modificada por Wright et al. (1996). Foi utilizado soro albumina bovina (BSA) para geração de uma curva padrão e depois realizada a leitura em espectrofotômetro. As concentrações de GT e GFE foram transformadas em mg g<sup>-1</sup> de solo, considerando o volume total de sobrenadante e peso de amostra de solo seco. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos pertencente ao Departamento de Gestão e Recuperação de Terras do Instituto de Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP).

### **5.1.3. Análise estatística descritiva**

Os resultados foram submetidos à análise descritiva univariada, na qual foram determinadas as medidas de tendência central (média) e de variabilidade (desvio padrão) e de dispersão relativa (coeficiente de variação).

### **5.1.4. Análise estatística**

Para a verificação das diferenças entre teor de glomalina e os parâmetros, textura, idade e substrato foi realizado à análise de variância (ANOVA). E para verificação do grau de correspondência entre os teores de glomalina e a morfometria dos agregados foi utilizada a análise de Correlação de Pearson e Análise de Componente Principal, com apoio do Software XLStat Versão 5.3.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.3.1 Análise da quantificação de glomalina: Estatística Descritiva

Nos resultados obtidos para glomalina facilmente extraível (GFE) apresentados na tabela 15, nota-se que os valores médios na área experimental denominada Mina 1 (nível 0 de recuperação), não possuem concentração da proteína relacionada GEF possíveis de serem quantificadas, pois em todos os diâmetros e peneira, a Mina 1 apresentou valores igual à zero, ou seja, abaixo do limite de detecção do aparelho. Enquanto todas as outras áreas em estágio intermediário e avançado de recuperação (Mina 2, 3, 4, 5 e 6) apresentam valores crescentes no sentido do ecossistema de referência. A Capoeira e a Mata apresentaram os maiores valores para esse indicador, com médias variando de 5.97 a 7.64 mg g<sup>-1</sup> de solo (Capoeira) e 5.31 a 8.26 mg g<sup>-1</sup> de solo (Mata), demonstrando novamente melhores condições do solo e equilíbrio do ecossistema de referência nessas áreas (Tabela 15).

**Tabela 15** – Valores médios determinados para Glomalina Facilmente Extraível (GFE mg g<sup>-1</sup>)

|      | GFE                | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata  |
|------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|
| 0.71 | Média              | 0.00   | 2.44   | 2.50   | 3.67   | 3.49   | 5.25   | 5.97     | 5.31  |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.28   | 0.10   | 0.21   | 0.52   | 0.54   | 0.28     | 0.27  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 11.42  | 3.85   | 5.85   | 14.80  | 10.31  | 11.41    | 5.13  |
| 1.0  | Média              | 0.00   | 3.20   | 4.51   | 4.77   | 8.77   | 6.51   | 7.64     | 8.26  |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.48   | 0.41   | 0.49   | 0.67   | 0.49   | 0.31     | 0.41  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 15.02  | 9.07   | 10.37  | 7.57   | 7.47   | 4.16     | 4.94  |
| 2.0  | Média              | 0.00   | 3.64   | 3.57   | 3.83   | 4.42   | 6.65   | 7.44     | 7.08  |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.25   | 0.68   | 0.62   | 0.64   | 0.35   | 0.60     | 0.58  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 6.93   | 19.05  | 16.18  | 14.43  | 5.22   | 8.06     | 8.26  |
| 4.0  | Média              | 0.00   | 3.93   | 4.36   | 3.75   | 3.02   | 5.31   | 7.16     | 6.57  |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.55   | 0.45   | 0.49   | 0.59   | 0.45   | 0.68     | 0.80  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 13.98  | 10.24  | 13.06  | 19.56  | 12.33  | 9.53     | 12.16 |
| 6.0  | Média              | 0.00   | 3.72   | 3.56   | 2.86   | 2.77   | 7.36   | 7.11     | 7.64  |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.18   | 0.23   | 0.51   | 0.08   | 0.85   | 0.60     | 0.37  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 4.88   | 6.41   | 17.82  | 3.06   | 11.59  | 8.38     | 4.84  |

Estudos sobre o efeito de sistemas de uso do solo na formação e estabilidade de agregados através da quantificação de glomalina apresentaram resultados

próximos (SIX et al., 2002; TRUBER, 2013), sustentando a hipótese de que o estado de agregação máxima ocorre em solos sob vegetação natural, onde atividade microbiológica está ativa influenciando positivamente na agregação do solo e produção de glomalina (BEDINI et al., 2007; FOKON et al., 2012).

Na tabela 16, os resultados obtidos para a proteína relacionada à glomalina total (GT) são bem maiores que a GFE, devido ao processo diferenciado para extração da GT ser mais intenso que à GFE, deste modo tal alteridade já era esperada entre elas. Mesmo na extração mais profunda, os valores médios na Mina 1 foram igual à zero. Desta forma, é possível evidenciar que esse solo não possui agregação e a atividade biológica pode ser considerada inexistente, de acordo com esse parâmetro. As minas 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam o aumento gradual nos valores médios entre as minas, desvio padrão com baixa dispersão e coeficiente de variação baixo dentro da faixa de normalidade (<25%).

**Tabela 16** – Valores médios determinados para Glomalina Total (GT mg g<sup>-1</sup>)

|      | GT                 | Mina 1 | Mina 2 | Mina 3 | Mina 4 | Mina 5 | Mina 6 | Capoeira | Mata  |
|------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|-------|
| 0.71 | Média              | 0.00   | 4.59   | 7.45   | 7.37   | 9.24   | 12.09  | 15.20    | 12.21 |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.21   | 0.24   | 0.61   | 0.17   | 0.59   | 0.64     | 0.76  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 4.57   | 3.18   | 8.34   | 1.84   | 4.84   | 4.20     | 6.19  |
| 1.0  | Média              | 0.00   | 7.26   | 7.21   | 5.16   | 10.49  | 15.90  | 18.24    | 13.21 |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.41   | 0.59   | 0.51   | 0.53   | 0.52   | 0.38     | 0.24  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 5.64   | 8.21   | 9.96   | 5.09   | 3.26   | 2.11     | 1.80  |
| 2.0  | Média              | 0.00   | 5.61   | 7.27   | 8.45   | 9.98   | 16.18  | 19.18    | 14.03 |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.34   | 1.03   | 0.43   | 0.34   | 0.84   | 0.47     | 0.70  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 6.12   | 14.22  | 5.13   | 3.40   | 5.17   | 2.43     | 4.97  |
| 4.0  | Média              | 0.00   | 7.46   | 8.46   | 8.16   | 9.47   | 16.12  | 18.52    | 15.39 |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.76   | 0.47   | 0.34   | 0.39   | 1.41   | 0.94     | 1.67  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 10.23  | 5.51   | 4.21   | 4.11   | 8.76   | 5.09     | 1.82  |
| 6.0  | Média              | 0.00   | 7.09   | 10.29  | 12.14  | 12.69  | 17.92  | 19.36    | 17.11 |
|      | Desvio padrão      | 0.00   | 0.51   | 0.09   | 0.37   | 0.66   | 0.81   | 0.68     | 1.44  |
|      | Coef. variação (%) | 0.00   | 7.22   | 0.87   | 3.04   | 5.20   | 4.50   | 3.49     | 8.39  |

Os resultados demonstram grau de desenvolvimento positivo nessas áreas e atividade biológica ativa, conseqüentemente melhorando a agregação do solo degradado. No entanto, os maiores valores da proteína relacionados à GT concentraram se Capoeira, em todos os diâmetros (Tabela 16) (Liu et al., 2020).

Uma tendência semelhante foi observada por Kumar et al, 2019, em estudo de cronosequência de minas de carvão à céu aberto recuperada em condições tropicais, onde as áreas mais antigas apresentaram teor de glomalina maior em relação às áreas mais jovens. Os locais recuperados mostrou diferenças significativas com a idade da revegetação nas áreas com idade 1 à 26 em relação ao local de floresta natural. O conteúdo do GFE variou entre 0.3 e 3.2 g kg<sup>-1</sup> e GT entre 0.7 e 7.3 g kg<sup>-1</sup>, valores mais baixos foram observados em mina de estágio jovem, moderada em áreas de idade intermediária e mais alto em solos de antigos locais recuperados e ecossistema de referência (KUMAR et al, 2019).

Os dados de Reyes et al., (2018), foram bem diferentes, considerando que a pesquisa foi realizada na periferia oriental da Amazônia em uma região de cultivo, em área jovem (3 à 4 anos), meia idade (6 à 8 anos), florestas secundárias degradadas (50) e em florestas tropical maduras (> 120 anos). Segundo os autores os conteúdos GFE e GT não diferiram significativamente ao longo da sucessão, nem entre estações do ano. As médias gerais foram de 1.14 ± 0.32 g kg (GT) e 0.40 ± 0.04 g kg<sup>-1</sup> (GFE) e enquanto as médias da nossa pesquisa realizada em área minerada em recuperação (10 à 50 anos) na região norte da Amazônia variaram entre 2.44 ± 7.64 mg g<sup>-1</sup> (GFE) e 4.59 ± 19,56 mg g<sup>1</sup> (GT), sendo as médias mais altas encontradas em áreas mais velhas, Mata e Capoeira.

De modo geral os teores de glomalina facilmente extraível e glomalina total encontrados no presente estudo estão próximos aos encontrados por Purin (2005) (1.08 a 5.85 mg g<sup>-1</sup> solo), enquanto na pesquisa de Thuber (2014) em diferentes tipos de manejo e plantio os resultados tiveram pequenas variações pra GFE (0.88 à 1.54 mg g<sup>-1</sup>) e GT (3.20 à 4.34 mg g<sup>-1</sup>). Fokom et al. (2012), encontraram valores de GFE e GT de 6.51 e 8,45 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente. Segundo os autores pode existir uma ampla variação nos teores encontrados. Em solo de floresta, esses autores encontraram valores de 10.56 mg g<sup>-1</sup> para GFE e 15,67 mg g<sup>-1</sup> para GT.

Wright & Upadhyaya (1998), acreditam que as frações de glomalina podem variar de 1 a 20 mg g<sup>-1</sup> de solo, em diferentes tipos de solos e diferentes regiões. Segundo Rillig et al., (2001), em solos de floresta nativa foi possível extrair > 60 mg g<sup>-1</sup> de glomalina do solo, no entanto esse valor pode ultrapassar 100 mg g<sup>-1</sup> em solos

tropicais do Hawaii com idade estimada de 4,1 milhões de anos (RILLIG et al., 2006).

#### 4.3.2 Análise de Variância relacionada ao teor de glomalina

A análise de variância (ANOVA) para avaliar as diferenças entre Glomalina e áreas mineradas em recuperação em relação ao ecossistema de referência, idade de desenvolvimento florestal, substrato, diâmetro da peneira e suas interações, mostrou-se como um potencial indicador para diferenciar estado de agregação em solos recuperados, apresentando diferenças significativas ( $<0,05$ ) e intervalo de confiança de 95%. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $a < 0,05$ ).

**Tabela 17** - Resultado ANOVA para avaliar as diferenças entre idade e GFE e GT.

| Mina         | Mina 1   | Mina 2    | Mina 3    | Mina 4    | Mina 5    | Mina 6    | Capoeira  | Mata           |       |   |       |   |       |   |       |   |
|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|
| <b>Idade</b> | <b>0</b> | <b>10</b> | <b>12</b> | <b>15</b> | <b>20</b> | <b>30</b> | <b>50</b> | <b>&lt;100</b> |       |   |       |   |       |   |       |   |
| <b>GFE</b>   | 0.40     | a         | 3.38      | b         | 3.77      | b         | 3.94      | b              | 5.95  | c | 6.21  | c | 6.77  | c | 7.06  | d |
| <b>GT</b>    | 0.21     | a         | 6.84      | b         | 7.81      | b         | 8.51      | c              | 10.37 | d | 14.42 | d | 15.64 | d | 18.10 | e |

\* Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $a < 0,05$ ).

As médias dos grupos em subconjuntos são exibidas com base nas médias observadas. Na tabela 17 é possível notar com clareza a diferenciação das áreas e da idade de manejo em relação ao ecossistema de referência. As áreas com 20 e 30 anos em estágio avançado de recuperação assemelham-se ao ecossistema de referência e são exibidas no mesmo subconjunto, as áreas com idade intermediárias entre 10, e 15 anos de manejo também se agruparam no mesmo subconjunto (b), enquanto a nível 0 encontra se isolada em grupo distinto (a).

A produção de glomalina é influenciada pelo estado de agregação, pois, solos com menor grau de agregação, há menor formação de hifas conseqüentemente, menor produção de proteína, de acordo com Rillig e Steinberg (2002). O que pode ser explicado pelo fato de ocorrer economia na produção de micélio para que ocorra a síntese de glomalina, que consiste em alto gasto energético para o microbionte (TRUBER, 2013). Desde forma a quantificação de glomalina permite observar que há a maior agregação conforme avança o processo de recuperação (LIU et al., 2020).

A ANOVA da glomalina em relação às peneiras de diferentes diâmetros mostrou diferenças significativas em apenas 3 subgrupos, agrupando os diâmetros medianos em um mesmo subgrupo (b), conforme tabela 18. Para GFE os valores médios apresentados demonstram pequena variação, com mínima de 3.52 mg g<sup>-1</sup> (0,71 mm) e máxima 5.19 mg g<sup>-1</sup> (6 mm). Enquanto a GT apresentou valores crescentes ao longo das peneiras com pequenas variações nos diâmetros médios (8.48 à 11.56 mg g<sup>-1</sup>), confirmando que cada tipo e tamanho de agregado tem seu próprio significado em termos de funcionamento e fertilidade do solo (PECHE FILHO et. al. 2018).

**Tabela 18** - Resultado ANOVA para avaliar as diferenças entre diâmetros em relação GFE e GT.

| Peneira    | 0.71 mm | 1.0 mm | 2.0 mm  | 4.0 mm  | 6 mm    |
|------------|---------|--------|---------|---------|---------|
| <b>GFE</b> | 3.52 a  | 4.18 b | 4.48 b  | 4.52 b  | 5.19 c  |
| <b>GT</b>  | 8.48 a  | 9.92 b | 10.07 b | 10.43 b | 11.56 c |

\* Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, não são significativamente diferentes pelo teste Tukey (a < 0,05).

Os resultados da Tabela 18 demonstram que cada diâmetro reflete o estado de agregação de forma diferente, permitindo confirmar que o processo de agregação pode ser mais claro na peneira de 2, 4 e 6 mm, por apresentar maior concentração de glomalina, pode ser considerado mais representativo para avaliar o processo de agregação. Pois grandes macroagregados desempenham um papel importante no acúmulo de carbono lábil, que é importante para manter a estabilidade dos agregados do solo (ZHIJIE et al., 2019). Segundo Liu et al., (2020), macroagregados possuem maior concentração da proteína o solo relacionada à glomalina (PSRG) e apresentam correlação positiva com argila, consequentemente atuam como agente cimentante mantendo as partículas unidas, aumentando a estabilidade e melhorando a capacidade agregação do solo.

A interação da glomalina tanto GFE quanto GT em relação ao tipo de substrato e textura também foram positivas na diferenciação das minas (Tabela 19). As minas 4, 5 e 6 ao longo de todas as análises morfométricas tanto físicas quanto microbiológicas possuem características semelhantes de solo com substrato PL e textura argilosa, sempre muito próximas às áreas naturais consideradas como ecossistema de referência, demonstrando que o tipo de manejo e tipo de solo

favorece diretamente na condição da produção da glomalina e conseqüentemente favorecem a agregação e estabilidade estrutural das áreas em recuperação.

**Tabela 19** - Resultado ANOVA para avaliar as diferenças entre Substrato e Textura em relação GFE e GT.

| <b>Substrato</b> | <b>Nível 0</b> |   | <b>WP</b> |   | <b>RS</b> |   | <b>PL</b> |   | <b>NATURAL</b> |   |
|------------------|----------------|---|-----------|---|-----------|---|-----------|---|----------------|---|
| <b>GFE</b>       | 0.40           | a | 3.38      | b | 3.94      | c | 4.46      | c | 6.77           | d |
| <b>GT</b>        | 0.21           | a | 6.08      | b | 7.81      | c | 11.51     | d | 14.42          | e |

| <b>Textura</b> | <b>Siltílosa</b> |   | <b>Arenosa</b> |   | <b>Argilosa</b> |   | <b>Argilo arenosa</b> |   | <b>NATURAL</b> |   |
|----------------|------------------|---|----------------|---|-----------------|---|-----------------------|---|----------------|---|
| <b>GFE</b>     | 0.4              | a | 3.67           | b | 5.38            | c | 6.21                  | d | 7.22           | e |
| <b>GT</b>      | 0.21             | a | 6.95           | b | 12.85           | c | 15.64                 | d | 18.54          | d |

\*N0: Nível zero; WP: Whashing planting, RS: Rejeito Seco, PL: Piso de lavra, Natural: ecossistema de referência.

\* Médias seguidas da mesma letra, na linha não diferem entre si, não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha < 0,05$ ).

Segundo Jamiołkowska et al., (2018), a translocação do solo pode causar alterações na população de micorrízicos arbusculares e abundância de fungos no perfil do solo e esses processos também podem influenciar o conteúdo de glomalina e as propriedades do solo relacionados à agregação (GISPERT et al., 2017). Por isso, diversas pesquisas mostram os FMA e a proteína do solo relacionada à glomalina como indicadores biológica qualidade do solo nos ecossistemas florestais (Rillig et al., 2006; Fokom et al., 2012; Vasconellos et al., 2016).

Com base nos resultados do presente estudo e de outros grupos de pesquisa ao redor do mundo, podemos dizer que a quantificação da glomalina consistiu em um bom indicador de mudanças causadas pelo uso do solo, podendo ser usada como indicador da condição da agregação do solo degradado, por atender integralmente os fatores e por ser correlacionada com importantes atributos do solo (RILLIG et al., 2003).

Ao longo dos anos diversos estudos foram feitos para tentar explicar as diferenças na concentração extraída de glomalina e concluíram que a temperatura não influencia nos valores de glomalina, pois não houve diferença significativa entre a quantidade de glomalina nas amostras armazenadas em diferentes temperaturas. Além disso, segundo Reys et al., (2018), não houve correlações entre a sazonalidade e produção de glomalina evidenciadas em floresta tropical. No entanto, alguns autores observaram correlação negativa entre concentrações de glomalina e

alto pH do solo, pois fungos tendem a predominar em solos ácidos, devido à maior concorrência com bactérias e outros organismos em solos alcalinos (BRADY; WEIL, 2008; HADDAD; SARKAR, 2003; RILLING et al., 2003).

De acordo com Loverlock et al. (2004), a disponibilidade de nutrientes pode influenciar negativamente a produção de glomalina, pois em condições de maior disponibilidade principalmente N e P, apresentaram menores concentrações de glomalina. Enquanto correlações positivas entre as frações de glomalina e o teor de carbono orgânico, têm sido fortemente evidenciadas (RILLING et al., 2003; TRUBER, 2014; SILVA et al., 2016). Outros estudos também têm relatado que a produção de glomalina pode ser influenciada pelo sistema de uso do solo, sendo menor em solos agrícolas/manejados do que em solos nativos ou não cultivados (RILLIG et al., 2003; BIRD et al., 2002).

Segundo Rillig et al. (2001), os principais fatores que estão envolvidos no controle da produção de glomalina no solo ainda não são claros. Contudo, segundo estes autores a combinação de concentração de nutrientes, clima, tipo do hospedeiro e diversidade de FMAs influencia a deposição dessas proteínas no solo. Além disso, a quantidade de glomalina encontrada também pode variar de acordo com o tipo de solo (WU et al., 2012), pois a concentração de argila influencia na agregação devido a expansão e dispersão das partículas de solo, refletindo em um solo com maior estabilidade dos agregados.

Para o presente estudo, sugere-se que este resultado tenha ocorrido pela diferença na classe textural, pois a argila pode atuar na proteção da glomalina, reduzindo a ação de microrganismos decompositores. Além disso, conforme dados apresentados o tipo de manejo realizado nas áreas mineradas foi fundamental no desenvolvimento do ecossistema em recuperação, contribuindo para a produção da proteína relacionada à glomalina e melhorando a condição do agregado do solo minerado em processo de recuperação.

### 4.3.3 Análise de correlação relacionada ao conteúdo de glomalina e morfometria dos agregados do solo

A Matriz de Correlação Pearson analisou a correspondência entre a Glomalina facilmente extraível, glomalina total e Morfometria dos agregados do solo nas áreas mineradas em processo de recuperação (Tabela 20). A proteína do solo relacionada à glomalina apresentou correlação significativa com os parâmetros morfométricos dos agregados do solo, no entanto a GFE e GT foram positivamente correlacionados apenas com a área, diâmetro de Feret, Max/Min, DMG do agregado do solo. Esses parâmetros morfométricos apresentaram correlações positivas, indicando redundância para essas variáveis.

Já a circularidade, arredondamento, Min Feret dos agregados do solo apresentaram correlação negativa com a glomalina. Além disso, a GFE e GT apresentaram correlação positiva com textura do solo argilosa e correlação negativa com textura arenosa e siltílica (DE GRYZE et al., 2010; LIU et al., 2020). A análise possibilitou validar a hipótese de correlação entre principais variáveis do presente estudo, apresentando correlação positiva entre GFE, GT, DMG, AREA, FERET e ARGILA em todas as amostras testadas.

**Tabela 20** – Matriz de Correlação Pearson - Glomalina e Morfometria dos agregados do solo com 2.0 mm de diâmetro.

| Variáveis | GFE         | GT          | Area        | Circul      | Arred       | D. Feret    | MinFeret    | Max/min     | DMG         | Argilosa    | Siltílica   | Arenosa      |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| GFE       | <b>1.00</b> | <b>0.61</b> | <b>0.15</b> | -0.22       | -0.14       | <b>0.27</b> | -0.13       | <b>0.28</b> | <b>0.84</b> | <b>0.28</b> | -0.07       | -0.01        |
| GT        |             | <b>1.00</b> | <b>0.24</b> | -0.21       | -0.08       | <b>0.25</b> | -0.04       | <b>0.23</b> | <b>0.68</b> | <b>0.25</b> | -0.10       | 0.03         |
| Area      |             |             | <b>1.00</b> | 0.04        | 0.08        | <b>0.92</b> | 0.10        | <b>0.92</b> | <b>0.45</b> | 0.12        | -0.04       | -0.04        |
| Circul    |             |             |             | <b>1.00</b> | <b>0.25</b> | -0.02       | 0.04        | <b>0.31</b> | -0.49       | -0.01       | 0.18        | -0.10        |
| Arred     |             |             |             |             | <b>1.00</b> | 0.02        | 0.13        | <b>0.83</b> | <b>0.44</b> | -0.19       | 0.06        | 0.10         |
| D. Feret  |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | <b>0.88</b> | 0.03        | <b>0.47</b> | 0.11        | -0.08       | -0.03        |
| MinFeret  |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | 0.15        | 0.22        | 0.08        | -0.05       | -0.01        |
| Max/min   |             |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | 0.10        | -0.18       | 0.11        | 0.10         |
| DMG       |             |             |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | 0.11        | -0.08       | 0.18         |
| Argilosa  |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | <b>0.40</b> | <b>-0.80</b> |
| Siltílica |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b> | <b>-0.60</b> |
| Arenosa   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <b>1.00</b>  |

\*Os valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância  $\alpha=0.001$ . \*\* GFE (glomalina facilmente extraível), GT (glomalina total), DMG (Diâmetro médio geométrico), Arred. (arredondamento), CIR (circularidade) e DF (diâmetro de Feret).

Segundo Liu (2020), tanto as concentrações da proteína relacionada à GT quanto a GFE também foram linearmente correlacionadas com a estabilidade agregada por meio do DMG e com a argila. Em estudo sobre a relação entre a

concentração microbiana biomassa, C orgânico associado ao agregado e glomalina em solos agrícolas, correlacionou positivamente o DMG com CO, GT e GFE, apresentando maior estabilidade do agregado do solo através dos efeitos positivos dos agentes de ligação do solo (ZANG et al., 2015). Tal correlação positiva indica o importante papel do microbiota na formação e estabilidade do agregado, devido a taxas de decomposição variáveis das células hifais, esporos resultando na produção de glomalina, conforme publicado por Bedini et al. (2007). Zhang et al., (2017), afirma que a glomalina produzida (GFE e GT) se correlaciona positivamente com fatores edáficos do solo e infecções fúngicas por FMA e pode ser usado no monitoramento da recuperação de solos degradados.

Outros estudos em condição diferenciada também relatam correlação positiva e elevada com DMG e variáveis como diversidade dos FMAs (BEDINI et al., 2009), Carbono Orgânico Total (NOBRE et al., 2015; Loss et al., 2015) e Nitrogênio, (FOKON et al. 2012), destacando que devido à glomalina ser bastante relacionada com os principais indicadores de agregação, sua grande contribuição resulta diretamente na estruturação do solo (DEMENOIS et al., 2018; ZHIJIE et al., 2019).

#### **4.3.4 Análise de componentes principais relacionada à glomalina e morfometria de glomalina**

O valor obtido no teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (0,6) indicou como aceitável para a aplicação do PCA (HAIR et al., 2010; KAISER, 1974). Quatro componentes principais (PCs) apresentaram autovalores  $\geq 1$ , representando 88% da variabilidade total dos dados (Figura 13a).

A primeira componente principal (PC1) incluiu três variáveis morfométricas com valores de carregamento significativos (Área, Feret, MinFeret), atendendo ao critério de  $\pm 0,55$  proposto por Hair Jr. et al. (2010) para o tamanho da amostra (Figura 13b). Essas variáveis explicaram mais de 99% da variabilidade da PC1 e cerca de 31,5% da variação total dos dados. As demais variáveis apresentaram valores de carregamento muito baixos, abaixo do valor mínimo proposto por Hair Jr. et al. (2010) ( $\pm 0,3$ ) para fornecer poder explicativo na PCA.

A segunda componente principal (PC2) foi ocupada por duas variáveis morfométricas, arredondamento e Max/Min (Figura 13c). Essas variáveis explicaram

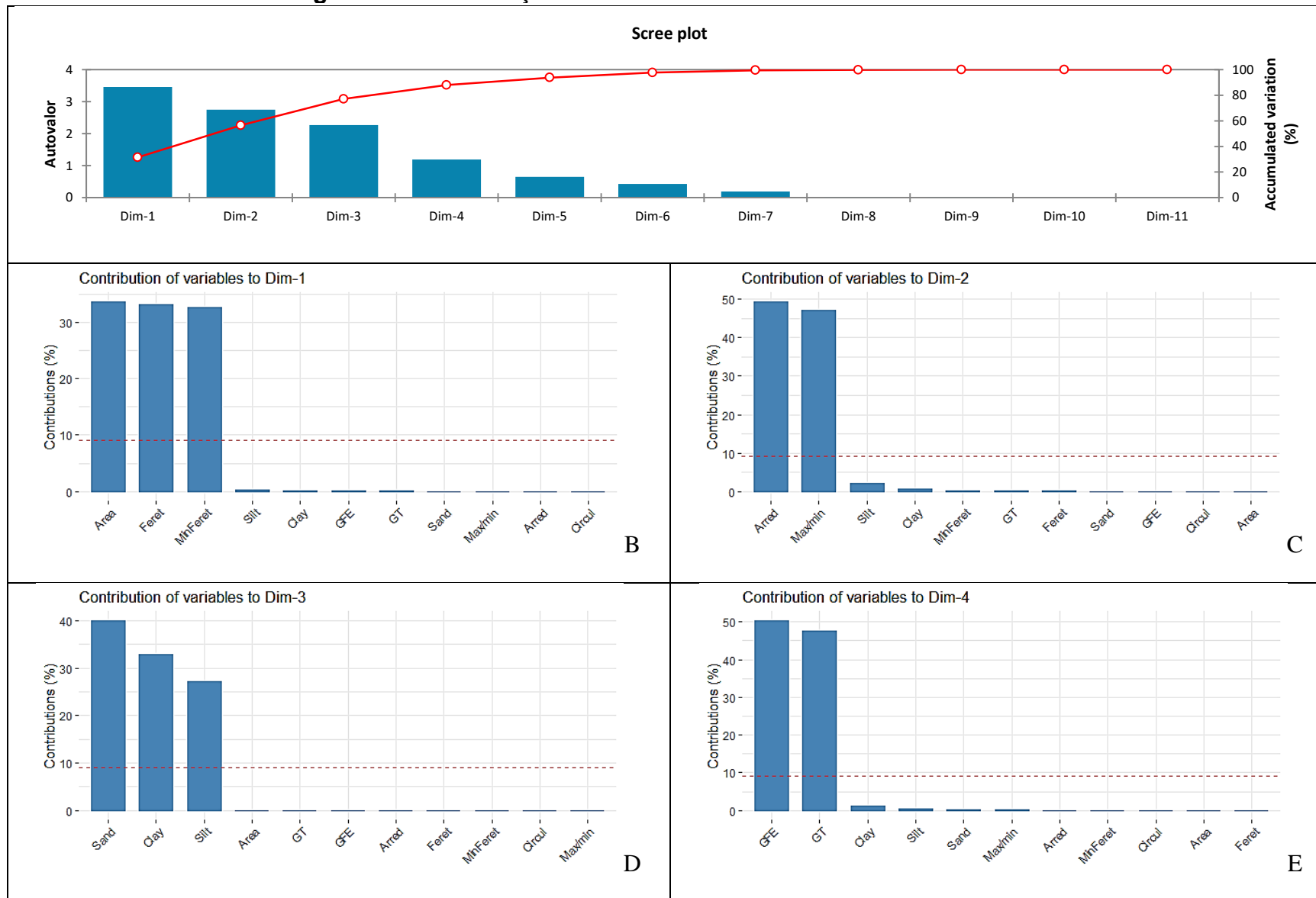
96,5% da variação retida da PC2, respondendo por 25% da variação total dos dados. Quase toda a variação retida (99,9%) do PC3 pode ser explicada pelas variáveis de textura do solo, porcentagem de argila, silte e areia (Figura 13d). Essas variáveis acumularam 20,6% da variação total dos dados. O PC4 apresentou 97,8% da variação total retida nas variáveis relacionadas ao conteúdo de glomalina (GFE e GT), respondendo por 10,6% da variação total dos dados (Figura 13e)

Todo fenômeno que envolve recuperação de área degradada é multidimensional e complexo, por isso não é possível simplificar em apenas uma variável ou componente principal. Esta interpretação parte de uma análise multidisciplinar que exige um estudo sobre o caráter antrópico do fenômeno e sua relação com os componentes bióticos e abióticos para entender se a variabilidade acontece de forma aleatória ou relacionada (ANDRADE, 2016). A variabilidade dos atributos do solo pode estar relacionada pelos seus fatores intrínsecos (fatores de formação) e pelos fatores extrínsecos, normalmente empreendidos pelas práticas de manejo do solo (adubação, calagem, dentre outros) (Carvalho et al., 2003).

Neste sentido, observa-se que a maior parte das diferenças entre as imagens da forma dos agregados pode ser associada às maiores fontes de variação desse fenômeno (diferença entre morfometria dos agregados), que ocorreram em função das 5 variáveis que compõem a componente principal 1 e 2. As duas primeiras PCs demonstram como a variabilidade dos dados podem ser subdividida bem como sua magnitude, pois apresentam um autovalor maior retendo maior porção variabilidade, que pode explicar as diferenças a respeito do processo de agregação em áreas mineradas em processo de recuperação.

Desta forma, as maiores variações ocorreram na Área, Feret e Min Feret, demonstrando diferenças entre os agregados. O arredondamento e relação MAX/MIN também são parâmetros que demonstram diferenças entre os agregados, de forma satisfatória (~25%). As diferenças que existem pela granulometria são próximas da PC2 (20%) e as existentes pelo teor de glomalina muito mais sutis, ou de menor magnitude (10%). Se considerarmos que estamos observando é o estado de agregação do solo, poderíamos dizer que, de acordo com essa amostra, ele pode depender de quatro tipos de informação, dois associados a aspectos morfométricos, um associado à textura do solo e outro ao teor de glomalina.

**Figure 13 - Contribuição das variáveis da PCA na área minerada.**



Os escores de PC1 e PC2 permitiram a diferenciação das minas desativadas em recuperação, associando arredondamento dos agregados do solo com as medidas de Feret e Área (Fig. 14a). O ecossistema de referência e as florestas recuperadas sob piso de lavra (PL) se assemelham e foram agrupados na mesma região, no quadrante inferior direito, enquanto a washing plant (WP) e a mina céu aberto (nível 0) no quadrante superior esquerdo (Figura 14b). Esses resultados indicam que o arredondamento das partículas do solo não pode estar diretamente associada à melhoria da agregação do solo, uma vez que as partículas minerais, provenientes do processo de mineração, podem assumir formas arredondadas. As medidas de Área e Feret podem estar relacionadas à variação intragrupo, refletindo as diferenças na forma dos agregados do solo. Segundo Crawley (2007), a variação intragrupo é a variação que não está relacionada diretamente ao efeito do tratamento analisado (agregação do solo), essa variação é baseada nos desvios dos valores observados em relação à média do nível de tratamento.

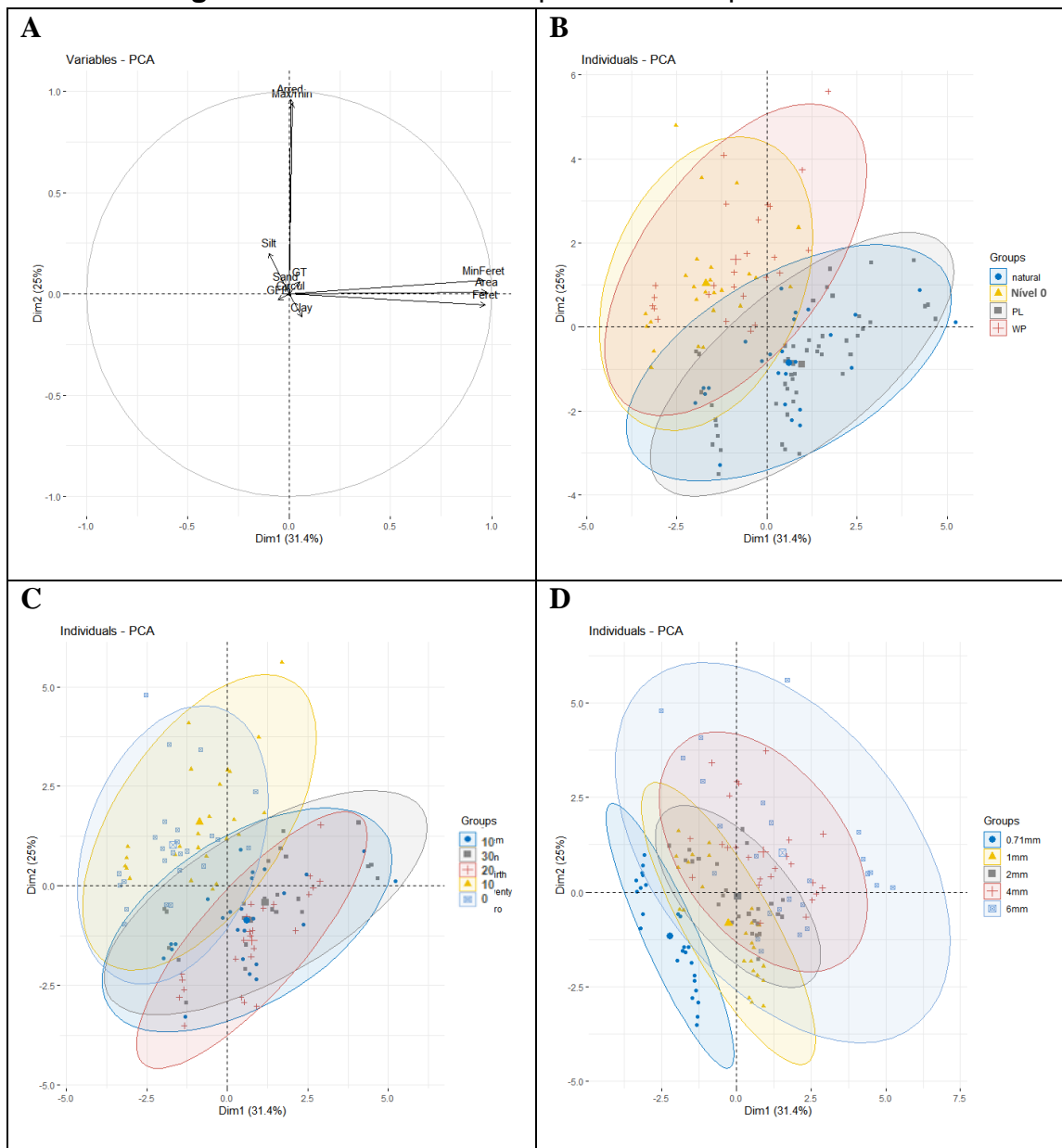
Desta a forma, a existência de partículas minerais como grânulos arredondados nas amostras devido ao próprio histórico da área pode justificar esse resultado, pois as amostras foram coletadas em solo de rejeito minerado e submetido ao processo restauração florestal. Por isso, apenas o arredondamento pode ser um parâmetro tendencioso para análise da agregação, principalmente em áreas degradadas por mineração, ou com pouca ação orgânica e pouca estruturação pedológica (TAVARES, 2008). Mesmo após a restauração florestal, o processo de desenvolvimento do solo é muito mais lento que o processo de formação florestal, devido à necessidade de tempo prolongado (REICHERT et al., 2009), o local ainda apresenta muitas partículas minerais que podem apresentar o formato arredondado mesmo com pouca agregação.

A idade de desenvolvimento florestal mostrou uma tendência semelhante, com florestas recuperadas mais antigas e ecossistema de referência sendo plotada no quadrante inferior direito e florestas mais novas e mina aberta plotadas no quadrante esquerdo superior (Figura 14c). Considerando o tamanho do diâmetro das peneiras, foram plotadas separadamente, permitindo sua diferenciação. Os agregados retidos nas peneiras de 6.0 e 4.0 mm foram plotadas em uma região mais ampla, ocupando quase todos os quadrantes, indicando uma maior variação na

forma e no tamanho dos agregados do solo, tendendo ao formato arredondado e com maior área. (Figura 14d).

As peneiras de 2 mm foram plotadas no centro da Figura 14d, enquanto as peneiras de 1.0 e 0.71 mm foram plotadas no canto esquerdo inferior. Observa-se menor variabilidade nas peneiras  $\leq 1.0$  mm, desta forma, quanto menor à área dos agregados, menor é o arredondamento da forma. Esse resultado pode indicar que essas peneiras apresentaram grande variação no formato dos agregados do solo e a menor variação na Área.

**Figura 14 – Análise de Componente Principal na Dim 2 / Dim 1**



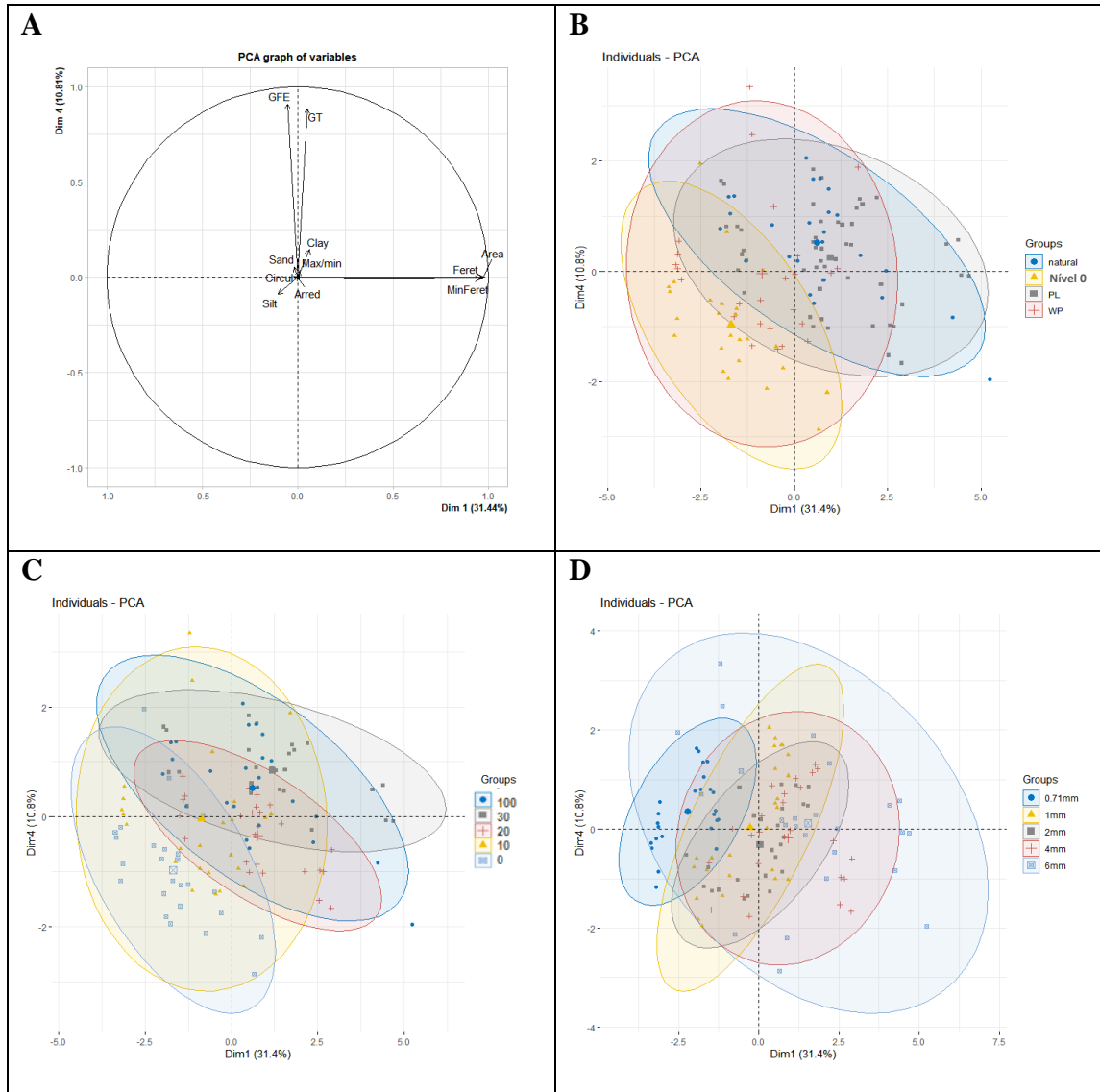
Os scores da PC1 e PC4 (Figura 15a) também mostraram os agregados de solo do ecossistema de referência sendo plotados na mesma região das florestas recuperadas sob piso de lavra (Figura 15b), enquanto os agregados de solo da mina Nível 0 foram plotadas no quadrante inferior esquerdo. As florestas recuperadas com o substrato WP foram plotadas sobrepondo os outros grupos (ecossistema de referência, mina piso de lavra e mina nível 0). Os resultados obtidos para WP podem indicar que o processo de agregação do solo está ocorrendo, porém ainda existem partículas minerais no solo.

Para a idade de desenvolvimento florestal resultados semelhantes foram obtidos, locais mais antigos tenderam a ser plotados na direção positiva dos eixos do PC2 (Figura 15c), indicando o aumento da glomalina com o aumento da idade da floresta. Os locais de 10 anos foram plotados sobrepondo a mina Nível 0 e locais mais antigos, indicando a existência de agregados de solo e partículas minerais. As florestas 20 anos mais velhas foram plotadas no centro da Figura 15C, indicando a condição intermediária entre os locais mais jovens e os mais velhos. As peneiras mostraram a mesma tendência da Figura 15D. As peneiras de 6.00 e 4.00 mm foram plotadas em uma região mais ampla, ocupando quase todos os quadrantes (Figura 15D). As apreensões de 2 mm e 1 mm foram plotadas no centro da Fig. 15d, e peneiras de 0.71 mm plotadas separadas na direção negativa do eixo PC1.

O conteúdo de glomalina não permitiu a diferenciação das áreas, estando relacionado apenas às variações intragrupo. No entanto, nota-se que quanto maior é a área e Feret, maior a concentração do teor de glomalina. Em termo de agregação as Minas sob PL e o ecossistema de referência estão deslocadas na mesma região, demonstrando proximidade na condição de agregação natural, enquanto a Nível 0 se posiciona de forma mais distante da condição agregação “ótima” (natural). Já as áreas com substrato WP ocupam região mais abrangente, em condição intermediária compondo os 2 eixos de transição. A idade apresenta a mesma tendência (Figura 15C). No entanto, observa-se novamente, maior variabilidade na peneira 6.0 mm, variabilidade intermediária na peneira 2.0 mm, 4.0 mm e menor variabilidade nas peneiras de 1.0 mm e 0.71 mm (Figura 15D). Deste modo, a peneira ser 2 e 4 mm podem ser considerada ideal para referência de peneira de diagnóstico por ser mais representativa, não pertencendo à condição de extremos. A

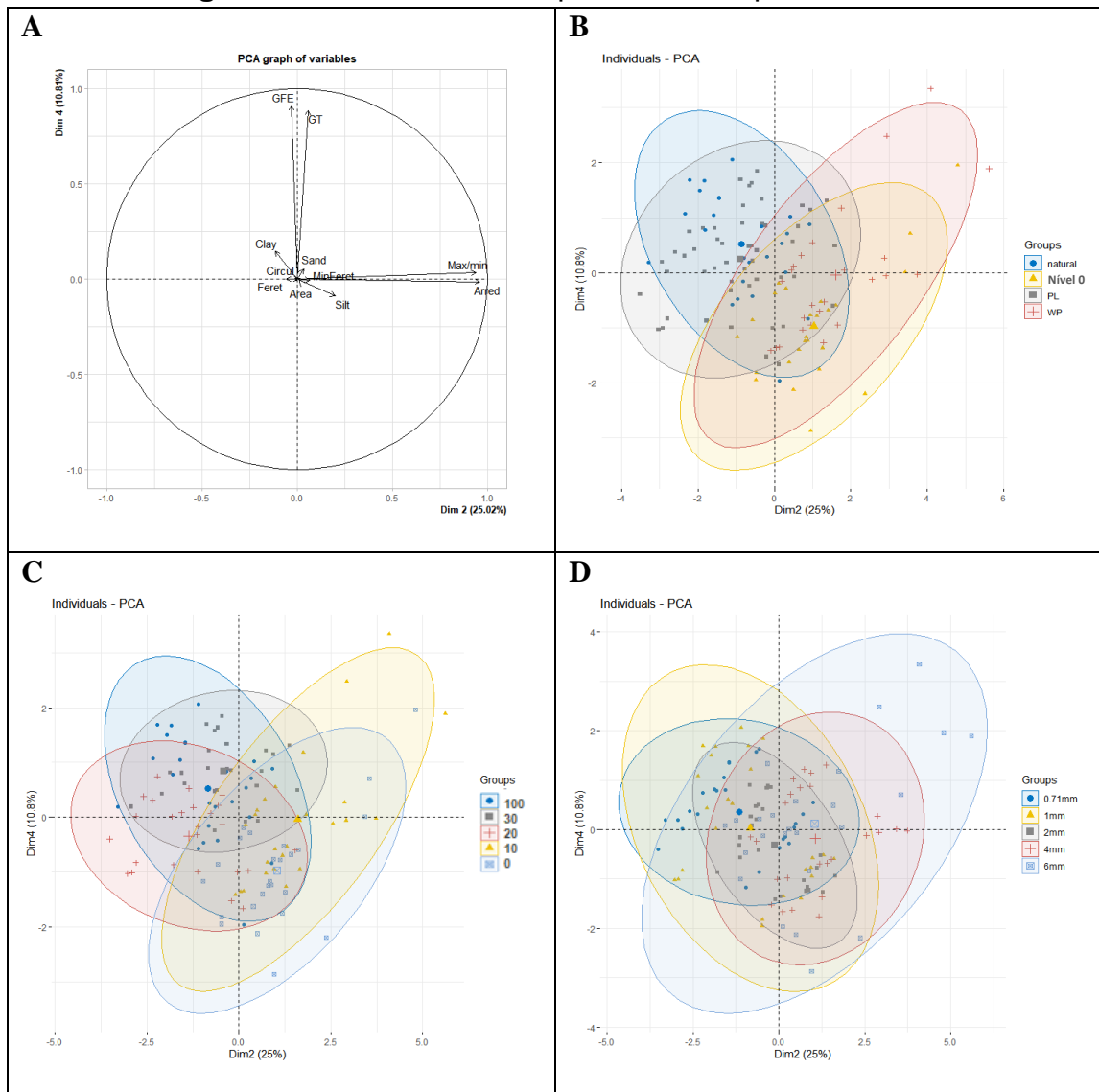
peneira 6.00 mm, é mais abrangente, conseqüentemente, possui maior variabilidade das amostras, sendo assim, quanto maior o diâmetro da peneira maior a variação da área, Feret, Arredondamento.

**Figura 15 – Análise de Componente Principal na Dim 4 / Dim 1**



Os escores da PC2 e PC4 não permitiram uma diferenciação clara de nenhum grupo (Figura 16). As referências do ecossistema também foram plotadas na mesma região das florestas sobre da mina piso de lavra (Figura 16b). No entanto, sobrepondo as outras classes no centro do Biplot, como nível 0 e WP. As sobreposições também foram observadas na classificação da idade da floresta (Figura 16c) e peneiras (Figura 16d), não permitindo a diferenciação entre as mais antigas e jovens, ou diâmetro.

**Figura 16 – Análise de Componente Principal na Dim 2 / Dim 1**



A análise de componente principal apresentou valores de carregamento muito baixos, para fornecer poder explicativo na PCA em relação à GFE e GT, respondendo por apenas 10,6% da variação total dos dados. Embora numerosos estudos já destacassem que glomalina é um dos principais condicionadores de revegetação e sucessão ecológica contribuindo potencialmente para a agregação, restauração de terras degradadas em várias escalas. Desde a descoberta da glomalina (1990), um progresso significativo na pesquisa foi desenvolvido para conhecer as relações e funções ecológicas da glomalina (SINGH et al., 2020). No entanto, considerando a complexidade do processo de agregação do solo e a necessidade de entendimento sobre o papel da glomalina na melhoria dos problemas de degradação do solo, sugere-se que mais estudos sejam realizados neste sentido para preencher lacunas na pesquisa.

## 5.2. CONCLUSÃO

- ✓ Utilizando a quantificação da proteína relacionada à glomalina foi possível qualificar o nível de atividade biológica nas áreas em recuperação, demonstrando potencial para ser utilizada no monitoramento e avaliação do solo em processo de recuperação.
- ✓ A proteína do solo relacionada à GRSP-T e GRSP-EE aumentou nas áreas com estágios mais avançados de recuperação, mostrando-se, sensíveis às mudanças ambientais e diferenciando o grau de desenvolvimento de solo minerado em recuperação.
- ✓ Por meio da matriz de correlação Pearson foi possível identificar as correlações entre as principais variáveis do estudo, apresentando correlação positiva entre PSRG-FE/GT, ARGILA e parâmetros morfométricos, DMG, AREA, FERET e MAX/MIN, indicando que a produção de glomalina pode ter produzido melhorias na estrutura do solo, aumentando a estabilidade e agregação do solo.
- ✓ Os resultados obtidos para PCA evidenciam que o processo de agregação do solo está ocorrendo, permitindo diferenciar as áreas degradadas do ecossistema de referência através de algumas variáveis. No entanto, os resultados mostram que existem partículas minerais no solo indicando que apenas circularidade das partículas do solo não pode estar diretamente associada à melhoria da agregação do solo, uma vez que as partículas minerais, provenientes do processo de mineração, podem assumir formas circulares e arredondadas.
- ✓ Se considerarmos que estamos observando o estado de agregação do solo, então poderíamos dizer que, de acordo com a PCA, quatro tipos de informações são fornecidas sobre as variáveis, duas associadas a aspectos morfométricos, um associado à textura do solo e por último teor de glomalina, sendo as duas primeiras mais explicativas que as demais.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo permitem aceitar a hipótese de que existe relação entre a morfometria dos agregados e o teor de glomalina, permitindo avaliar o processo de agregação do solo em áreas com diferentes estágios de revegetação. Pois, foi possível identificar diferentes níveis de resposta ambiental e grau de desenvolvimento em áreas mineradas em recuperação.

As características morfométricas: DMG, área, circularidade e diâmetro de Feret, possibilitaram analisar a qualidade do solo em relação à agregação, além de explicar melhorias na estabilidade estrutural. A caracterização da variabilidade morfométrica dos agregados pode ser usada como ferramenta para auxiliar na gestão ambiental e tomada de decisão, visando à melhoria da condição da agregação em solos degradados.

Desta Forma, é possível confirmar a aplicabilidade dos indicadores em relação à qualidade da agregação de solo minerado em processo de recuperação, pois essa abordagem metodológica integra um conjunto de indicadores quantitativos e qualitativos que fornecem uma síntese das condições ambientais bióticas e abióticas, contribuindo para o entendimento da situação real e as possibilidades de ações mitigadoras dos impactos no solo degradado. Confirmando o potencial de utilização dessas variáveis como indicadores no monitoramento das áreas degradadas em recuperação.

## 7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ANOVA AYRES, M.; AYRES JR., M.; AYRES, D.L.; SANTOS, A. A. **Bioestat – Aplicações estatísticas nas áreas das ciências bio-médicas. Ong Mamiraua.** Belém, PA. Baker, R. S. J. 2010. Data Mining. International Encyclopedia of Education. 3 ed., 112-118. 2007.

ARAÚJO, E.R. FERNANDES, F.R.C. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral.** Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/images/capitulos/2016/CCL0001-00-16.pdf> acessado em: Agosto/2019.

ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas.** 4 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 281 p. 2008.

BARROS, J.N. **Legislação Ambiental Aplicada à Mineração.** Meio ambiente - Legislação Cruz das Almas, BA: UFRB . p. 86, 2017.

BARROS, D. A. **Matéria orgânica e agregação do solo em áreas sobre influência da mineração de bauxita na região do planalto de Poços de Caldas, MG.** Agropecuária Científica no Semiárido. P. 101- 186, 2018.

BASTOS. J. L. D.; DUQUIA, R. P. **Medidas de dispersão: os valores estão próximos entre si ou variam muito? Measures of dispersion: are all values close to each other or do they vary a lot?** Scientia Medica, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 40-44, 2007.

BEURLEN, H.; CASSEDANNE, J. P. **The Brazilian Mineral Resources.** Earth Scientific Reviews. 17, 177-206, 1981.

BRADFORD, M.M. **A rapid and sensitive method for mycorrhizal association with barley on sewage-amended plots.** Soil Biology and Biochemistry, v.20, p. 945-948, 1976.

BRADSHAW, A. **Restoration of mined lands—using natural processes.** Ecological Engineering. 8, 255-269, 1997.

BRADY, N. C., WEIL, R. R. **The nature and properties of soils.** 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, p. 975, 2008.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; CASSOL, L. C. **Dinâmica da agregação induzida pelo uso de plantas de inverno para cobertura do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 23:383-391, 1999.

CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; AZCON, R.; ROLDAN, A. **Formation of stable aggregate in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: Effect of AM fungi and organic amendments.** Applied Soil Ecology, v. 33, p. 30-81, 2006.

CARNEIRO, R.F.V., CARDOZO JÚNIOR, F.M., PEREIRA, L.F., ARAÚJO, A.S.F., SILVA, G.A. **Fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no Nordeste do Brasil.** Revista Ciência Agronômica 43: p. 648–657, 2012.

CARVALHO, M.C., FENGLER, F.F., LONGO, R.M, RIBEIRO, A.I. **Evaluation of soil quality in recovery process in the Brazilian Amazon (RO) based on fuzzy logic.** International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR) ISSN: 2455-4847 Vol. 04 – Issue 10 p. 96-104, 2019.

CARVALHO, M. P. TAKEDA, E. Y. FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP).** Seção vi - Manejo e Conservação do solo e da água. R. Bras. Ci. Solo, p. 695-703, 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução 01/1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 fev. 1986.

COSTA, R.C.A. **Indicadores Morfométricos: Uma Ferramenta Diagnóstico da Vulnerabilidade Ambiental.** Universidade Estadual Paulista – Unesp Câmpus de Jaboticabal, 2015.

CRAWLEY, M.L. **The R Book: Statistical Techniques.** 2ª Ed. Wiley, NJ, 2012.

DALE, V.H BEYELER, S.C. **Challenges in the development and use of ecological indicators.** Ecological Indicators, Vol 1, Issue 1, p. 3-10, 2001.

DEMENOIS, J. CARRICONDE, F. BONAVENTURE, P. MAEGHT, J. STOKE, A. REY, F. **Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol.** Geoderma 312, p. 6–16, 2018.

DE GRYZE, S.; BOSSUYT, H.; SIX, J.; van MEIRVENNE, M.; GOVERS, G. & MERCKX, R. **Factors controlling aggregation in a minimum and a conventionally tilled undulating field.** Eur. J. Soil Sci., 58:1017-1026, 2008.

DINIZ, J.S. **Teores de Glomalina e Substâncias Húmicas em diferentes estágios sucessionais de Floresta Seca.** Dissertação Mestrado. Instituto de Biologia, UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. **Quantitative indications of soil quality: a minimum data set.** In: Doran JW, Jones AJ. eds Methods for assessing soil quality. Madison: SSSA. ed.49, p. 25-37, 1994.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos,** Rio Janeiro, 2004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3 ed. Brasília: Embrapa p. 353, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo.** 3 ed. Brasília: Embrapa p. 573, 2017.

FAUSTINO, L.L **Indicadores da Qualidade Física e Morfológica de um Argissolo Vermelho-Amarelo em Áreas de Pastagem Revegetadas por Leguminosas Arbóreas.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF Campos Dos Goytacazes – Rio de Janeiro, 2018.

FENGLER, F.H. **Aplicação da Análise Dimensional em Indicadores Ambientais de Áreas Degradadas pela Exploração de Cassiterita.** Tese. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2018.

FOKOM, R. ADAMOU, S. TEUGWA, M.C. BEGOUDE BOYOGUENO, A.D. NANA, W.L. NGONKEU, M.E.L. TCHAMENI, N.S. NWAGA, D. TSALA NDZOMO, G. AMVAM ZOLLO, P.H. **Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of South Cameroon.** Soil Till. Res. 120, p. 69–75, 2012.

GANDOLFI, S. **Uma Teoria sobre o Processo de Restauração Ecológica de Florestas Tropicais e Subtropicais: Proposta e Aplicação**. Tese de Livre Docência, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP. p. 105, 2017.

GISPERT, M., EMRAN, M., PARDINI, G., DONI, S., CECCANTI, B. **The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability**. *Geoderma* 202-203, p. 51–61, 2013.

GISPERT, M., PARDINI, G., COLLDECARRERA, M., EMRAN, M., DONI, S. **Water erosion and soil properties patterns along selected rainfall events in cultivated and abandoned terraced fields under renaturalisation**. *Catena* 155, p. 114–126, 2017.

GONÇALVES, L. G. DE G.; BORAK, J. S.; COSTA, M. H.; SALESKA, S. R. ET AL. **Overview of the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia Data Model Intercomparison Project (LBA-DMIP)**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182– 183, p. 111-127, 2013.

HADDAD, M. J.; SARKAR, D. **Glomalin, a newly discovered component of soil organic matter: Part II - Relationship with soil properties**. *Environmental Geosciences*, v. 10, n. 03, p. 99-106, 2003.

HAIR, Jr; BLACK, W. C; BABIN, B. J; ANDERSON, R. E e TATHAM, R. L. **Multivariate Data Analysis**. 6ª edição. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2010.

HERNANI, L.C. **Agregação do solo**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sistema\\_plantio\\_direto/arvore](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sistema_plantio_direto/arvore)>; Acesso em 06 de setembro de 2019.

HICKMANN, C. COSTA, L.M. SCHAEFER, C.E. FERNANDES, R.B.A. **Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um argissolo vermelho- amarelo sob diferentes manejos na mata atlântica**. *R. Bras. Ci. Solo*, 35 p. 2191-2198, 2011.

IBAMA - Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2005. **Plano de Manejo da Floresta Nacional do Jamari – Rondônia**, MMA/IBAMA: Volume I, Diagnóstico.

IBAMA. **Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta Celebrado entre a Companhia Estanífera do Brasil CESBRA e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis** — IBAMA. Brasília, 1999.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. 2017.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Produção mineral brasileira**. Brasil. Disponível em: <http://www.ibram.org.br>. 2015.

JAMIOLKOWSKA, A., KSIEZNIAK, A., GALAZKA, A., HETMAN, B., KOPACKI, M., SKWARYLOBEDNARZ, B. **Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review**. *Int. Agrophys* 32, p. 133–140, 2018.

KAISER, H. F. **The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis**. *Psychometrika*, 23, 187-200. 1974. doi:10.1007/BF02289233

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F. & SCHUMAN, G.E. Soil quality: **A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial)**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, p. 4-10, 1997.

KOHLRAUSCH. F. JUNG, C.F. **Áreas Ambientais Degradadas: Causas e Recuperação** Área temática: Gestão Ambiental & Sustentabilidade, 2015.

LEI, H.; PENG, Z.; YIANG, H.; YANG, Z. **Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mine**. *Ecological Engineering*. 94, p. 638-646, 2016.

LEINFELDER, R.R., IRAMINA, W.S., ESTON, S.M. Mining as a tool for reclamation of a Degraded Area. **Rev. Esc. Minas**. 68, p. 215-220, 2015.

LIMA, A.T., MITCHELL, K., O'CONNELL, D.W., VERHOEVEN, J., CAPPELLEN, P.V. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. **Environmental Science & Policy**. 66, p. 227-233, 2018.

LIU, H., WANG, X., LIANG, C., AI, Z., WU, Y., XU, H., XUE, S., & LIU, G. **Glomalinrelated soil protein affects soil aggregation and recovery of soil nutrient following natural revegetation on the Loess Plateau.** *Geoderma*, 357, 2020.

LONGO, R. M. RIBEIRO, A. I. MELO, W. J. **Physical and chemical characterization of the substratum of degraded areas by tin mining.** *Bragantia* [online], 64. P. 101-107, 2005.

LONGO, R. M. RIBEIRO, A. I. MELO, W. J. **Use of green fertilizing in the recovery of soils degraded by mining in the amazon forest.** *Bragantia*. 7, p.139-146, 2011.

LOVERLOCK, C. E. *et al.* **Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungal across a tropical rain forest landscape.** *Journal of Ecology*, v. 92, n. 02, p. 278-287, 2004.

LUNA, L., MIRALLES, I., ANDRENELLI, M., GISPERT, M., PELLEGRINI, S., VIGNOZZI, N., SOLÉ-BENET, A. **Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region.** *Catena*. 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. **Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária.** *Pesq. Agropec. Bras.* Brasília, v 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

MACHADO, R. A. S.; LOBÃO, J. S. B.; VALE, R. D. M. C.; SOUZA, A. P. M. J. **Análise morfométrica a definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15. Curitiba. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2011, p.144, 2011.

MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; ANDRADE, A. G.; VALENCIA, L. I. O. **No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil.** *Soil, Tillage Research*, Amsterdam, n. 80, p. 185-200, 2005

MANCINELLI, R.; DI FELICE, V.; RADICETTI, E.; CAMPIGLIA, E. **Impact of land ownership and altitude on biodiversity evaluated by indicators at the landscape level in Central Italy.** Land Use Policy, v. 45, p. 43-51, 2015.

MARTÍNEZ, F. J. ; ARTEGA, F.S J; MONREAL; F. J. C.; KRAVCHENKO; A. N.; WANG, W. **Soil aggregate geometry: Measurements and morphology.** Geoderma. p. 36- 48, 2015.

MELLONI, R. & CARDOSO, E.J.B.N. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas e endófitos. I. Método empregado.** R. Bras. Ci. Solo, 23:53-58, 1999.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de Manejo da Floresta Nacional do Jamari – Rondônia.** Volume II, Brasília, 2005.

MUNKHOLM, L. J. DEEN, B. ZIDAR, T. **Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management.** Geoderma, 268, p. 52-59, 2016.

MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S.K.; MASTO, R.E. **Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study.** Ecological Engineering 71 p.10-20, 2014.

MUKHOPADHYAY, S. MASTO, R.E. YADAV, A. GEORGE, J. RAM, L.C. SHUKLA, S.P. **Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil.** Science of The Total Environment. 542, p. 540-550, 2016.

OLSZEWSKI, N.; COSTA, L.M.; FERNANDES FILHO, E.I.; RUIZ, H.A.; ALVARENGA, R.C. & CRUZ, J.C. **Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens.** R. Bras. Ci. Solo, 28: p. 901-909, 2004.

PARROTTA, J.A., KNOWLES, O.H., **Restoring tropical forests on lands mined for bauxite: Examples from the Brazilian Amazon.** Ecological Engineering. 17, p. 219-239, 2001.

PECHE FILHO, A.F. **Variabilidade da Agregação em Amostras de Solos Agrícolas como Indicador de Qualidade: Uma Proposta Metodológica.** Tese. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2018.

PNIA. **Painel Nacional de Indicadores Ambientais: referencial teórico, composição e síntese dos indicadores da versão-piloto.** Brasília: Ministério Do Meio Ambiente. Secretaria Executiva – SECEX, Departamento de Gestão Estratégica – DGE, p. 96, 2014.

PURIN, S. **Fungos micorrízicos arbusculares: atividade, diversidade e aspectos funcionais em sistemas de produção de maçãs.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2005.

PURIN, S.; RILLING, M. C. **The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalina: limitations, progress, and a new hypothesis for its function.** *Pedobiologia*, v. 51, p. 123-130, 2007.

PEDLOWSKI M. A.; DALE V. H.; MATRICARDI, E. A. T.; SILVA FILHO, E. P. **Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brazil.** *Landscape and urban planning*. 38, p.149-157, 1997.

RIBEIRO, A.I.; FILHO, A. F.; ROSAS, C. L. G.; ALBIERO, D.; FENGLER, F. H.; MEDEIROS, G. A.; DINIZ, I. S.; CARVALHO, M. M.; LONGO, R. M. **Precision conservation: from visual analysis of soil aggregates to the use of neural networks.** *Revista Ciência Agronômica*, v. 51, n. 5. Fortaleza, CE, 2020.

PHILLIPS, J. **Climate change and surface mining: A review of environmenthuman interactions & their spatial dynamics.** *Applied Geography*. 74, p. 95-108, 2016.

RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; NICHOLS, K. A.; SCHMIDT, W. F.; TORN, M. S. **Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils.** *Plant and Soil*, v. 233, p. 167-177, 2001.

RILLING, M. C. *et al.* **Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to soil-use change.** *Plant and Soil*, v. 253, p. 293-299, 2003.

RILLIG, M. C.; MAESTRE, F. T.; LAMIT, L. J. **Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes.** *Soil Biology and Biochemistry*, v.35, p.1257-1260, 2003.

RABOTA, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTERA, S.; VOGEL, H.J. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma, 314, p. 122-137, 2018.

REINERT, D.J., REICHERT, J.M. **Propriedade física do solo.** Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, 2006.

REINERT, D.J., REICHERT, J.M. **SOLOS FLORESTAS – Solos no Ecossistema Florestal.** Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, 2009.

RIBEIRO, A.I., LONGO, R.M., FENGLER, F.H., MEDEIROS, G.A.; BRESSANE, A., CROWLEY, D.E., MELO, W.J. **Use of Self-Organizing Maps in the identification of different groups of reclamation sites in the Amazon Forest – Brazil.** International Journal of Sustainable Development and Planning. P. 827-833, 2016.

RILLIG, M.C. **Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation,** Can. J. Soil Sci., 84, p. 355-363, 2004.

RILLIG, M. C.; STEINBERG, P. D. **Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: a mechanism of habitat modification?** Soil Biology & Biochemistry, v. 34, p. 1371-1374, 2002.

RILLIG, M.C.; WRIGHT, S.F.; NICHOLS, K.A.; SCHMIDT, W.F. & TORN, M.S. **Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils.** Plant Soil, 233, p.167-177, 2001.

SANTOS, B. A. Recursos minerais da Amazônia. **Estudos Avançados.** 16, p. 123-152, 2002.

SANTOS, R. F. **Indicadores ambientais e planejamento.** In:\_\_\_\_\_ (Ed.) Planejamento ambiental: teoria e prática. São Paulo: Oficina do texto, p. 57-70, 2004.

SANTOS, R.D. LEMOS, R.C. SANTOS, H.G. KER, J.C. ANJOS, L.H.C. SHIMIZU, S.H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 6.ed. Viçosa, SBCS, 2013.

ŠARAPATKA, B. SOLANO, D. P. CIŽMÁR, D. **Can glomalin content be used as an indicator for erosion damage to soil and related changes in organic matter characteristics and nutrients?** Catena 181, p. 104 - 178, 2019.

SIDDQUI, Z.A. PICHTEL, J. **Mycorrhizae: An overview.** In: **Mycorrhizae Sustainable Agriculture na Foresty**, Springer Science, 2008, p. 108, 2017.

SILVA, C. F. PEREIRA, M.G. SANTOS, V.L. MIGUEL, D.L, SILVA, E.M.R. **Arbuscular Mycorrhizal Fungi: Composition, Length Extraradical Mycelium And Glomalin In Areas Of Atlantic Forest.** *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 419-433, abr.-jun., 2016 ISSN 0103-9954

SINGH, A. K. ZHU, X. CHEN, C. WU, J. YANG, B. ZAKARI, S. JIN JIANG, X. SINGH, N. & LIU, W. **The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems, Critical Reviews.** *Environmental Science and Technology*, 2020. DOI: 10.1080/10643389.2020.1862561

SIX, J. BOSSUYT, H. DEGRYZE, S. DENEFF, K. **A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics.** *Soil Tillage Res.*, 79, p. 7-31, 2004.

STANTURF, J. A.; PALIK, B. J.; DUNROESE, R. K. **Contemporary forest restoration: A review emphasizing function.** *Forest Ecology and Management*, v.331, p.292-323, 2014.

SOUZA, E. D., CARNEIRO, M. A. C., PAULINO, H. B., SILVA, C. A., BUZETTI, S., **Fractions of organic carbon, biomass and microbial activity in a Rhodic Hapludox under Brazilian cerrados submitted to different soil management.** *Acta Sci. Agron.* 28 (3), p. 323-329, 2006.

STANTURF, J.A., PALIK, B.J., DUMROESE, R.K. **Contemporary forest restoration: A review emphasizing function.** *Forest Ecology and Management.* 331, p. 292-323, 2014.

STÜRMER S.L., SIQUEIRA J.O. **Species richness and spore abundance of arbuscular mycorrhizal fungi across distinct land uses in Western Brazilian Amazon.** *Mycorrhiza* 21: p. 255–267, 2011.

TAVARES, S. R. L. **Recuperação de áreas degradadas: A visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 228, 2008.

TROEH, F.R.; THOMPSON, L.M. **Solos e fertilidade do solo.** In: **Siqueira, In: Muller, A.M. Indicadores e subsídios para o manejo e sustentabilidade de agroecossistemas e a transição agroecológica.** Cadernos de agroecologia. 1. ed. São Paulo: Andrei Editora Ltda, p. 751, 2007.

TRUBER, P. V. **Agregação de solo e ocorrências de fungos micorrízicos arbusculares em sistemas de rotação de cultura.** Dissertação de Mestrado e Ciências Agrárias – Unesp de Jaboticabal, 2013.

URBANEK, E. HALLETT, P. FEENEY, D. HORN. R. **Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems.** Geoderma, 140, p. 147-155, 2007.

VASCONSELLOS, R.L.F., BONFIM, J.A., BARETTA, D., CARDOSO, E.J.B.N. **Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicator of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil.** Land Degrad. Develop. 27, 325–334, 2016.

WALKLEY, A. & BLACK, I. A. **An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method.** Soil Science, v.37, p.29- 38, 1934.

WEINSTEIN, M.P.; LITVIN, S.Y.; KREBS, J.M. **Restoration ecology: ecological fidelity, restoration metrics, and a systems perspective.** Ecol. Eng., 65, pp. 71-87, 2014.

WRIGHT, S.F.; UPADHYAYA, A. **Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein or arbuscular mycorrhizal fungi.** Soil Science, v.9, n.161, p. 575-586, 1996.

WRIGHT, S.F.; UPADHYAYA, A. **A survey of soils aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi.** Plant Soil, v.198, p. 97-107, 1998.

WANG, S.; LIU, C.; ZHANG, H. **Suitability evaluation for land reclamation in mining area: A case study of Gaoqiao bauxite mine.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 21, 506-515, 2011.

WANG, J.; WEI, Y.; BING, Y.; ZHAO-XIA, L.; CHONG-FA, C.; REN-MING, M. **Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in ultisols of south-central China.** CATENA, 137, p 545-553, 2016.

WU, Q.S.; ELE, X.H.; ZOU, Y.N.; ELE, K.P.; SUN, Y.H. & CAO, M.Q. **Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationships with root mycorrhization, soil aggregates, carbohydrates, activity of protease and  $\alpha$ -glucosidase in the rhizosphere of Citrus unshiu.** Soil Biol. Biochem. 45, p.181-183, 2012.

YADA, M.M., MINGOTTE, F.L.C., MELO, W.J., MELO, G.P., MELO, V.P., LONGO, R.M., RIBEIRO, A.I. **Atributos químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema Amazônico.** R. Bras. Ci. Solo. 39, p. 714-724, 2015.

YOUNG, I.M. CRAWFORD, J.W. **Interaction and self-organization on the soil microbe complex.** Science, n. 304, p. 1634-1637, 2004.

ZALAMENA, J. **Impacto do uso da terra nos atributos químicos e físicos de solos do rebordo do Planalto – RS,** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ZHANG, Y., HE, X., ZHAO, L., ZHANG, J., XU, W. **Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin under Psammochloa villosa along a typical dune in desert, North China.** Symbiosis 73 (3), 145–153, 2017.

ZHANG, X. ZHANG, S. XING, Y. WANG. R. LIANG, W. **Organic amendment effects on aggregate-associated organic C, microbial biomass C and glomalin in agricultural soils.** Catena 123, 188–194, 2015.

ZHIJIE, C. XUEYA, G. YUAN, M. YANHONG, C. JUNHUI, Z. ZHENG, C. **Interactive effect of nitrogen addition and throughfall reduction decreases soil aggregate stability through reducing biological binding agents.** Forest Ecology and Management 445, 13–19, 2019.