

FELIPE HASHIMOTO FENGLER

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL EM INDICADORES
AMBIENTAIS DE ÁREAS DEGRADADAS PELA EXPLORAÇÃO DE
CASSITERITA**

Sorocaba
2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*

FELIPE HASHIMOTO FENGLER

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL EM INDICADORES
AMBIENTAIS DE ÁREAS DEGRADADAS PELA EXPLORAÇÃO DE
CASSITERITA**

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
2018

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências
ambientais



Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Unesp
Instituto de Ciência e Tecnologia – Câmpus de Sorocaba

Fengler, Felipe Hashimoto.

Aplicação da análise dimensional em indicadores ambientais de áreas degradadas pela exploração de cassiterita / Felipe Hashimoto Fengler, 2018.

104 f.: il.

Orientador: Admilson Irio Ribeiro.

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba), 2018.

1. Qualidade ambiental. 2. Ecossistemas. 3. Amazônia. 4. Recuperação ecológica. 5. Degradação ambiental. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Ciência e Tecnologia (Câmpus de Sorocaba). II. Título.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO DA ANÁLISE DIMENSIONAL EM INDICADORES AMBIENTAIS DE ÁREAS DEGRADADAS PELA EXPLORAÇÃO DE CASSITERITA

AUTOR: FELIPE HASHIMOTO FENGLER

ORIENTADOR: ADMILSON IRIO RIBEIRO

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



Prof. Dr. ADMILSON IRIO RIBEIRO
Engenharia Ambiental / UNESP - ICT Sorocaba



Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS
Engenharia Ambiental / UNESP - ICT Sorocaba



PESQUISADOR JENER FERNANDO LEITE DE MORAES
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais / INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS



Prof. Dr. ROBERTO WAGNER LOURENÇO
Engenharia Ambiental / UNESP - ICT Sorocaba



Profª. Drª. KELLY CRISTINA TONELLO
Departamento de Engenharia Florestal / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Sorocaba, 05 de março de 2018

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento e seu importante papel social e científico no Brasil.

A UNESP Sorocaba e o Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, pelo acolhimento, suporte institucional e empenho na formação de pessoas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Admilson Irio Ribeiro pelo seu comprometimento, amizade, liberdade, confiança e dedicação.

A todos os membros da banca, Profa. Dra. Kelly Cristina Tonello, Prof. Dr. Jener Fernando Leite de Moraes, Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço e Prof. Dr. Gerson Araujo de Medeiros, pela excelente arguição e contribuições valorosas.

Aos meus grandes amigos, Dr. Afonso Peché Filho, Msc. Moisés Storino e Prof. Dr. Manuel Enrique Gamero Guandique, pelas valiosas discussões, suporte e apoio.

A todos meus amigos da Pós-graduação em Ciências Ambientais.

A meus companheiros Adriano Bressane, Bruno Marques, Diego Cola, Fabrício Sperandio e Michel Xocaira, pela amizade e bons momentos vividos.

A Marcela Merides por todo carinho, compreensão e apoio.

A Leda Nogueira e sua família pela amizade e carinho.

A Profa. Dra. Regina M. Longo e a Malu por todos os presentes, momentos de alegria e risadas.

A minha família pela compreensão, carinho e apoio.

Ao Prof. Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda e a Profa. Dra. Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda pela excelente disciplina de lógica Fuzzy.

A todos os professores da UNESP Sorocaba.

Desejo muito sucesso a todos!

FENGLER, F. H. **Aplicação da Análise Dimensional em indicadores ambientais de áreas degradadas pela exploração de cassiterita**. 2018. 104 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Câmpus Experimental de Sorocaba, UNESP - Univ Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.

RESUMO

No contexto do desenvolvimento sustentável há um paradigma crítico, que retrata a relação entre o capital e a degradação ambiental. Conforme aumenta o cunho socioeconômico de determinada atividade, maior é a permissibilidade da sociedade aos seus efeitos ambientais negativos, sobretudo quando são apenas sentidos em nível local. Porém, após um passado de exemplos adversos, a meta por um estado de equilíbrio tem adquirido notoriedade em busca de uma nova perspectiva de desenvolvimento. Quando atividades de grande relevância, como a mineração, resultam em elevado grau de alteração do meio, há expectativa da sociedade quanto à mitigação ou compensação dos seus efeitos negativos, principalmente quando ecossistemas sensíveis são afetados. Porém, a complexidade ambiental dificulta a mensuração da extensão dos danos ambientais, bem como a efetividade de ações de recuperação. Nesse contexto se insere o presente estudo. Buscaram-se métricas e métodos compreensivos para a avaliação de florestas em recuperação em áreas minerárias na Amazônia brasileira. A técnica de modelagem com Análise Dimensional foi empregada de maneira a estabelecer índices adimensionais voltados à avaliação desses ambientes. Variáveis relacionadas ao desenvolvimento florestal, fauna, além das condições físicas, químicas e bioquímicas do solo foram empregadas, utilizando a priori o processo de conhecimento por descoberta em banco de dados em sua seleção. Dois estudos preliminares a Análise Dimensional foram realizados, fornecendo suporte para escolha das variáveis e entendimento da representatividade dos índices adimensionais obtidos. Como resultado uma proposta metodológica foi apresentada, para avaliação da condição fitossociológica de ambientes em recuperação em comparação ao ecossistema de referência. O grau de alteração do solo se mostrou como um dos fatores condicionantes, destacando a importância das ações iniciais de preparo, preliminarmente ao plantio. A análise dimensional se revelou como uma abordagem promissora, possibilitando sintetizar, representar e comparar as condições ambientais dos locais minerados e do ecossistema de referência. Porém, três índices assumiram um papel protagonista, com representação sistêmica do processo de recuperação ambiental, o primeiro expresso pela relação entre duas variáveis bioquímicas do solo, a respiração basal e atividade celulase (Pi2); o segundo (Pi8) obtido através de variáveis biológicas da fauna e da flora; e o terceiro (Pi10), integrando variáveis do solo, da fauna e da flora. Os resultados obtidos permitiram condensar avanços conceituais e metodológicos nesse documento, estruturando uma base para elaboração de propostas de avaliação de ecossistemas alterados e estabelecimentos de padrões de qualidade com base no ecossistema de referência Amazônico.

Palavras-chave: Qualidade ambiental, Ecossistema de referência, Amazônia, Restauração ecológica, Degradação.

FENGLER, F. H. **Application of the Dimensional Analysis in environmental indicators of areas degraded by cassiterite exploitation**. 2018. 104 f. Thesis (PhD in Environmental Sciences) - Experimental Campus of Sorocaba, UNESP - Univ Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.

ABSTRACT

There is a critical paradigm that portrays the sustainable development, the relationship between the capital and the environmental degradation. As the socioeconomic importance of a given activity increases, the greater will be the permissibility of society to its negative impacts, especially when they are only sensed at the local level. However, after several adverse examples in history, the aim for a state of equilibrium has acquired notoriety for a new perspective of development. When an activity of great relevance, as mining, results in high environmental alteration, there is an expectation of mitigation, or compensation, on its negative effects, especially when vulnerable ecosystems were affected. However, the environmental complexity not always allows a full comprehension of environmental damage, as well as the effectiveness of recovery actions in their reversal. This study aimed to search for comprehensive metrics and methods to evaluate of mined forests of Brazilian Amazonia. Dimensional Analysis was employed in establishing dimensionless index related to the environmental quality of the mined forests. Variables of forest development, fauna, and physical, chemical and biochemical conditions of the soil were employed, based on knowledge discovery in databases in its selection. Two preliminary studies to Dimensional Analysis were carried out, supporting the choice of variables and the further understanding about obtained dimensionless index. As a result, a methodological proposal was presented to evaluate the phytosociological conditions of recovering environments compared to the reference ecosystem. The degree of soil alteration was shown as a conditioning factor, highlighting the importance of the initial soil preparing actions, preliminary to revegetation. The dimensional analysis proved to be a promising approach, allowing synthesizing, representing and comparing the environmental conditions of the mined sites with the reference ecosystem. However, three indices played a major role, with systemic representation of the environmental recovery process, the first one expressed by the relationship between soil basal respiration and cellulase activity (Pi2), the second (Pi8), obtained through biological variables of fauna and flora; and the third (Pi10), integrating soil, fauna and flora variables. The obtained results allowed to condense conceptual and methodological advances in this document, structuring a basis for elaborating evaluation proposals for altered ecosystems and to establish quality standards, based on the reference ecosystem.

Keywords: Environmental quality, reference ecosystem, Amazonia, ecological restoration, land degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma de apresentação dos Capítulos da Tese.	4
Figura 2 - Fluxograma da Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados.	17
Figura 3 - Revisão do Fluxograma da Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados.	17
Figura 4 - Localização da área em estudo.	24
Figura 5 - Estrutura empregada na elaboração do estudo.	27
Figura 6 - Localização das parcelas amostradas para os parâmetros fitossociológicos.	31
Figura 7 - Dendograma resultante da Análise de Agrupamento, tomando a distância euclidiana e a o método de Ward, para os parâmetros fitossociológicos de minas desativadas em recuperação na Floresta Nacional de Jamari.	37
Figura 8 - Localização das parcelas amostradas para os parâmetros químicos e microbiológicos.	45
Figura 9 - Principais componentes de um box plot: media, quartis, whiskers, limites e outliers.	47
Figura 10 - Box plots obtidos a partir das variáveis físicas e bioquímicas, considerando a regra de intervalo 1,5 interquartil.	50
Figura 11 - Box plots obtidos a partir das variáveis de fertilidade do solo, considerando a regra de intervalo 1,5 interquartil.	51
Figura 12 - Localização das parcelas amostradas para os parâmetros químicos e microbiológicos.	67
Figura 13 - Armadilha pitfall instalada.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das principais etapas do processo de mineração de dados.	19
Tabela 2 - Descrição dos objetivos dos métodos de mineração de dados utilizados no ambiente educacional e em outras áreas de conhecimento.	21
Tabela 3 - Tipos de mineração de dados com potencial para aplicação em estudos ambientais.	22
Tabela 4 - Variáveis disponíveis para estudo.	26
Tabela 5 - Características gerais dos locais dos locais amostrados.	32
Tabela 6 - Resultados do teste Tukey na identificação de diferenças nos grupos formados pelo processo de agrupamento e valores do ecossistema de referência.	38
Tabela 7 - O coeficiente de correlação de Pearson e o valor p para as variáveis fitossociológicas das minas desativadas em recuperação.	41
Tabela 8 - Sumário estatístico dos dados dos solos minerados.	52
Tabela 9 - Sumário estatístico dos dados dos solos do ambiente de referência em floresta Amazônica perturbada.	53
Tabela 10 - Resultados da análise de correlação de Spearman tomando as variáveis bioquímicas, de fertilidade do solo e as características dos locais em recuperação.	56
Tabela 11 - Resultados da análise de componentes principais para os dados obtidos nos locais em recuperação considerando as variáveis de fertilidade do solo, propriedades bioquímicas e físicas.	59
Tabela 14 - Principais Características dos locais minerados.	67
Tabela 12 - Amostras e variáveis relacionadas ao solo empregadas na análise dimensional.	68
Tabela 13 - Amostras e variáveis relacionadas a meio biótico empregadas na análise dimensional.	68
Tabela 15 - Indicadores empregados na confecção de índices através da Análise Dimensional.	72
Tabela 16 - Matriz dimensional derivada dos indicadores de recuperação selecionados para a Análise Dimensional.	73
Tabela 15 -. Subespaço da Matriz dimensional, com determinante diferente de zero selecionado para a resolução do sistema de equações.	75
Tabela 18 -.Matriz solução obtida a partir do sub espaço selecionado, matriz identidade e P_i termos obtidos.	76
Tabela 19 - Valores obtidos para os produtos adimensionais tomando os dados das parcelas em recuperação e ecossistema de referência Amazônico.	78
Tabela 20 - Correlação de Kendall entre os indicadores ambientais e os índices adimensionais.	86
Tabela 21 - Resultados da análise de componentes principais para os dados obtidos nos locais em recuperação considerando os indicadores ambientais e índices adimensionais.	88

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	33
Equação 2	34
Equação 3	69
Equação 4	69
Equação 5	70
Equação 6	70
Equação 7	73
Equação 8	74
Equação 9	74
Equação 10	74
Equação 11	74
Equação 12	75
Equação 13	77
Equação 14	79
Equação 15	79
Equação 16	80
Equação 17	81
Equação 18	81
Equação 19	82
Equação 20	82
Equação 21	83
Equação 22	83
Equação 23	84
Equação 24	85
Equação 25	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	HIPÓTESE	5
1.2	OBJETIVOS	5
1.2.1	<i>Geral</i>	<i>5</i>
1.2.2	<i>Específicos.....</i>	<i>5</i>
2	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	6
2.1	MINERAÇÃO NO BRASIL E SUSTENTABILIDADE: UMA BREVE PERSPECTIVA.....	6
2.2	A FLORESTA NACIONAL DO JAMARI.....	8
2.3	RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO: A FALTA DE CONSENSO.....	10
2.4	RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO: AVALIAÇÃO E APTIDÃO	12
3	MINERAÇÃO DE DADOS.....	15
3.1	CONCEITUAÇÃO: MINERAÇÃO DE DADOS OU CONHECIMENTO POR DESCOBERTA?	15
3.2	PRINCIPAIS ETAPAS NO CONHECIMENTO POR DESCOBERTA EM BANCOS DE DADOS.....	16
3.3	TÉCNICAS DE MINERAÇÃO DE DADOS E APLICAÇÕES AMBIENTAIS	20
3.4	DETALHAMENTO DO SISTEMA DE CONHECIMENTO POR DESCOBERTA EM BANCO DE DADOS EMPREGADO NO ESTUDO.....	23
3.4.1	<i>Área em estudo e principais características dos locais minerados.....</i>	<i>23</i>
3.4.2	<i>Coleta de dados e análises</i>	<i>25</i>
3.4.3	<i>Estrutura do sistema de conhecimento por descoberta em banco de dados.....</i>	<i>26</i>
4	CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES EM RECUPERAÇÃO COM BASE NO DESENVOLVIMENTO FITOSSOCIOLÓGICO ^A	29
4.1	INTRODUÇÃO	29
4.2	METODOLOGIA	31
4.2.1	<i>Delineamento empregado</i>	<i>31</i>
4.2.2	<i>Estrutura florística.....</i>	<i>33</i>
4.2.3	<i>Análise Cluster</i>	<i>34</i>
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.3.1	<i>ANÁLISE CLUSTER E GRUPOS FORMADOS</i>	<i>35</i>
4.4	CONCLUSÕES	42
5	INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO PARA ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO	43
5.1	INTRODUÇÃO	43

5.2	METODOLOGIA	45
5.2.1	<i>Delineamento empregado</i>	45
5.2.2	<i>Coleta e análises de solo</i>	46
5.2.3	<i>Análise estatística</i>	46
5.3	RESULTADOS.....	48
5.3.1	<i>Análise box plot</i>	48
5.3.2	<i>Análise de correlação</i>	54
5.3.3	<i>Análise de Componentes Principais</i>	57
5.4	DISCUSSÃO	60
5.4.1	<i>VARIAÇÃO AMBIENTAL, ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA E SUPRESSIVIDADE DO SOLO</i>	60
5.4.2	<i>DANO AMBIENTAL E RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS</i>	62
5.5	CONCLUSÕES.....	63
6	ÍNDICES ADIMENSIONAIS COMO INDICADORES DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO	65
6.1	INTRODUÇÃO	65
6.2	METODOLOGIA	66
6.2.1	<i>Delineamento empregado</i>	66
6.2.2	<i>Coleta e análises de solo</i>	69
6.2.3	<i>Coleta e análises de dados biológicos</i>	70
6.2.4	<i>Cálculo dos índices adimensionais</i>	72
6.2.5	<i>Análises estatísticas</i>	76
6.3	RESULTADOS.....	77
6.3.1	<i>Análise dos produtos adimensionais obtidos</i>	77
6.3.2	<i>Análise de componentes principais</i>	87
6.4	DISCUSSÃO	89
6.5	CONCLUSÕES.....	92
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
8	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é marcado pela vanguarda em políticas regulatórias no avanço da degradação ambiental de territórios tropicais. Desde o período colonial existem exemplos de mecanismos reguladores para a conservação dos recursos naturais, a exemplo da Carta Régia de 13 de março de 1797.

Sua Lei máxima, a Constituição Federal de 1988, estabelece atualmente (Art. 225) que todos seus habitantes *“têm o direito e dever ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”*.

Porém, após 30 anos, o tema, bem como os paradigmas que o permeiam, trazem inúmeros desafios, não apenas tecnológicos ou metodológicos, como também conceituais.

A esse respeito, atividades minerárias tem grande impacto na sociedade brasileira, sendo responsável, em 2013, por aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto (US\$ 27,4 bilhões), com outros inúmeros benefícios econômicos, tecnológicos e sociais, ao País (IBRAM, 2013).

Todavia, como subproduto, a exploração de reservas minerais resulta em severas alterações ambientais, carecendo de um criterioso entendimento de seus danos resultantes para a implementação de medidas mitigadoras ou compensatórias (Phillips, 2016; Sousa et al., 2011; Monteiro, 2005; Pedlowski et al., 1997, Smith et al., 1991).

Tomando o compromisso de proteção e conservação do meio, há a necessidade de recuperação de áreas degradadas durante e após o término do processo de lavra (Leinfelder et al., 2015). Porém, há uma deficiência de conhecimento a respeito, que têm assumido grande relevância com o aumento da atividade minerária e, conseqüentemente, dos ambientes em processo de recuperação (Rosenfield e Müller, 2017; Ribeiro et al., 2016; Ribeiro et al., 2015; Stanturf et al., 2014; Rodrigues et al., 2009; Li et. al., 2006; Parrotta e Knowles, 2001; Miao e Marrs, 2000; Bradshaw, 2000, 1997; Bradshaw, 1984).

Inúmeras propostas metodológicas e casos de estudo, abrangem o processo de recuperação dos diferentes sistemas que compõe o meio, sobre inúmeras abordagens. Porém, dada à complexidade do fenômeno, há uma compartimentação

do entendimento do processo, que, em geral, tende a subdividir os atributos ecossistêmicos para fomentar sua compreensão (Aynekulu et al., 2016; Mukhopadhyaya et al., 2014).

Com a evolução conceitual e técnica no campo de estudo, têm se buscado nos novos paradigmas da recuperação ambiental um entendimento sistêmico do processo (Halme et al., 2013), com monitoramento de diversos componentes do meio e análise da sua inter-relação na reconstituição de ecossistemas (Lei et al., 2016; Philips et al., 2016; Lima et al., 2016; Ribeiro et al., 2016; Poncelet et al., 2014; Stanturf et al., 2014).

Diversos parâmetros são empregados para tal fim, tomando variáveis fitossociológicas, da fauna, físico-químicas, microbiológicas (Lei et al., 2016; Ribeiro, 2016; Yada et al., 2015; Mukhopadhyaya et al., 2014; Xiao et al., 2014), parâmetros fitossociológicos (Aynekulu et al., 2016; Lima et al., 2016; Mukhopadhyaya et al., 2014; Parrotta e Kwnowles, 2001) e, inclusive, parâmetros socioeconômicos (Sousa et al., 2011; Monteiro, 2005; Suzuki, 2003; Martinez-Alier, 2001;).

No entanto, a complexidade ambiental dificulta o estabelecimento de definições e regras gerais que orientem o planejamento e ações de gestão dos responsáveis pela recuperação dessas áreas. Como nem sempre os recursos e competências necessários para investigação da degradação e estabelecimento de ações mitigadoras, ou compensatórias, se encontram disponíveis, há uma maior dificuldade na obtenção de resultados satisfatórios (Stanturf et al., 2014).

Nesse escopo, a utilização de uma forma de análise integradora, como a Análise Dimensional, representa um avanço inovador no campo de estudo e pode trazer uma nova perspectiva no processo de avaliação da qualidade ambiental de locais degradados e em processo de recuperação ambiental. Seus fundamentos foram estabelecidos a partir do século XVIII em tentativas de se estabelecer as leis fundamentais da mecânica e da termodinâmica (Martins, 2004; Macagno, 1971) e na engenharia a técnica adquiriu grande importância para a modelagem em escala reduzida através do princípio de similitude, que estabelece a relação de similaridade geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo, em escala reduzida, e o protótipo, em escala real (Zlokarnik, 2002).

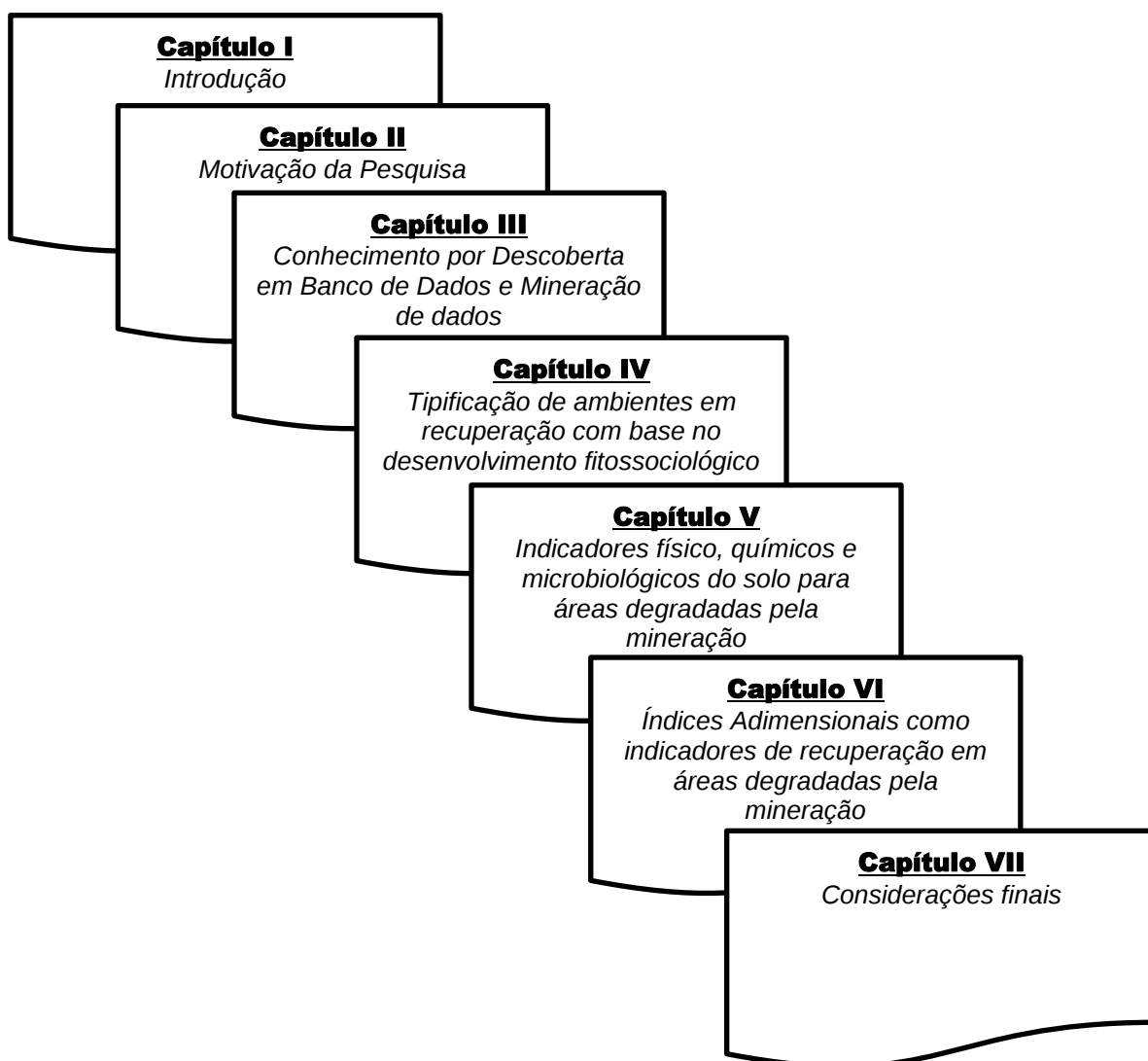
Porém, apesar dos benéficos que essa análise pode assumir, poucas iniciativas exploraram seu potencial em estudos ecológicos. O presente estudo buscou desenvolver métricas para a avaliação de ambientes perturbados tomando a

modelagem com a Análise Dimensional. Indicadores de recuperação ambiental e métodos compreensivos para avaliação de florestas mineradas foram analisados, tomando um banco de dados de locais em recuperação na Amazônia brasileira.

O documento foi organizado em sete Capítulos (Figura 1). No presente, ainda são apresentados os objetivos e a hipótese da pesquisa. Posteriormente, a base conceitual é retratada, buscando o posicionamento do estudo frente à literatura difundida até a data de publicação desse documento. No terceiro, o conjunto de dados é apresentado, além de uma breve revisão sobre o processo de mineração de dados e a estrutura metodológica empregada.

No quarto capítulo o primeiro estudo é apresentado, onde se buscou, através da avaliação de parâmetros fitossociológicos, a tipificação de locais em recuperação de acordo com a resposta vegetal obtida, de maneira a permitir o entendimento do comportamento dos indicadores ambientais nas diferentes condições ambientais resultantes do processo de mineração. Um segundo estudo foi necessário para entendimento do relacionamento entre as variáveis físico-químicas e microbiológicas no processo de recuperação ambiental, apresentado no capítulo 5. Em sequência os resultados obtidos com a Análise dimensional são apresentados, e, por fim, os últimos capítulos apresentam as considerações finais e as referências.

Figura 1 - Organograma de apresentação dos Capítulos da Tese.



1.1 Hipótese

(1) O emprego da Análise Dimensional, utilizando variáveis físicas, químicas e biológicas do solo, aliadas as variáveis de desenvolvimento vegetal, possibilita a determinação de índices integradores e sistêmicos para a avaliação do processo de recuperação ambiental de áreas degradadas pela mineração.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Investigar o potencial da Análise Dimensional como uma proposta integradora e sistêmica para avaliação de ambientes degradados pela mineração na Amazônia brasileira.

1.2.2 Específicos

2.1.1. Estudar o comportamento dos indicadores ambientais da base de dados existente na representação de diferenças entre os locais em recuperação e em relação ao ecossistema de referência;

2.1.2. Determinar índices adimensionais através de indicadores ambientais;

2.1.3. Verificar o potencial dos índices adimensionais obtidos na avaliação de ambientes em recuperação ambiental;

2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

2.1 Mineração no Brasil e Sustentabilidade: uma breve perspectiva

A mineração representa um setor importante na economia brasileira, trazendo diversos benefícios econômicos e sociais ao País. A abundância de recursos naturais fez com que o Brasil assumisse uma posição de destaque quanto à exportação de diversos minerais de interesse econômico, e, em conjunto com a China, Estados Unidos, Índia e Rússia, pertence ao grupo dos cinco Países com extensão territorial superior a três milhões de km², mais de 190 milhões de habitantes e Produto Interno Bruto superior a U\$900 bilhões.

Porém, apesar das grandes reservas existentes, algumas características do País, principalmente relacionadas à polarização de ocupação da região costeira (90% da população da década de 70 e 26% atualmente, IBGE, 2018), falta de infraestrutura e políticas governamentais, resultaram em um desenvolvimento tardio do setor (Machado e Figuerôa, 2001; Lloyd e Wheeler, 1977). Até a década de 50, a participação da produção mineral na economia era quase existente, sendo comandada eminentemente pela produção agrícola.

A partir da crise mundial do petróleo, nos anos 60, políticas voltadas para a exploração dos recursos minerais no Brasil começaram a se desenvolver, buscando a diversificação do mercado e diminuição da dependência de produtos estrangeiros, com a criação de mecanismos para a prospecção, exploração das reservas existentes e industrialização.

Atualmente, somente a mineração é responsável por aproximadamente 33% das exportações do País, considerando-se apenas a produção de minério, com um balanço positivo (exportação vs. importação) de U\$29,5 bilhões, e uma produção bruta de U\$38,7 bilhões/ano (IBRAM, 2012).

Entretanto, concomitantemente ao desenvolvimento social e econômico, foram desenvolvidas políticas para o controle dos impactos negativos da mineração sob o meio. Tal fato ocorreu pela magnitude e intensidade das alterações na paisagem decorrentes da atividade, além da localização de jazidas em regiões com ecossistemas de extrema sensibilidade como no Cerrado e a Amazônia. Monteiro (2005) exemplifica duas situações onde procedimentos que envolvem a valorização de recursos minerais culminaram em graves problemas ambientais.

O primeiro após o fechamento das primeiras minas submetidas à exploração industrial no Estado do Amapá, em uma usina de minério de manganês, implantada na década de 1970. Nesse caso, os rejeitos produzidos promoveram a contaminação de lençóis freáticos por arsênio, no município de Santana (AP), pela adoção de um processo produtivo que foi apresentado e aceito pela sociedade como portador de alta tecnologia e como fruto de anos de pesquisa, revelando-se, décadas depois, como uma “bomba de efeito retardado” e trazendo prejuízos imensuráveis ao meio e sociedade.

O Segundo, de origem similar, insere-se o caso do assoreamento do lago Batata, Oriximiná – PA, nos anos 90. Rejeitos do beneficiamento da bauxita despejados no local, pela justificativa de ausência de alternativa tecnologia, resultaram em grave dolo ao meio e população local. Como os procedimentos voltados para a prudência ambiental no processo se formularam posteriormente, após início da atividade, as práticas de exploração e despejo não foram tomadas como agressões ao meio, resultando em um passivo atribuído a sociedade.

Portanto, a recuperação das áreas degradadas pela mineração se tornou um componente fundamental para a proteção dos ecossistemas brasileiros e comunidades locais, sendo atualmente um requisito para mineração no País. Programas de recuperação de áreas degradadas têm atuado desde a década de 70 com objetivo de minimizar ou mitigar os impactos causados pela mineração (Leinfelder, et al. 2015; IBAMA, 2005; Parrota e Knowless, 2001).

Porém, a atividade constitui uma tarefa complexa e árdua, pois envolve diferentes técnicas e estratégias, sendo intimamente relacionadas ao nível de degradação do meio e o uso futuro definido para área (Almeida e Sánchez, 2004).

Como as reservas minerais normalmente se localizam no subsolo, em locais ocupados pela vegetação natural, e não podem ser acessadas sem a remoção das camadas de solo superficiais e cobertura vegetal, significativas modificações ambientais ocorrem, frequentemente com a alteração completa dos sistemas naturais (Bradshaw, 1997).

Ainda, os rejeitos provenientes do processo de mineração a céu aberto, são comumente dispostos na superfície, e, frequentemente, possuem características adversas ao ecossistema natural, tornando o restabelecimento de florestas complexas um grande desafio (Bradshaw, 2000).

Esses fatores associados à localização de reservas em Biomas tropicais sensíveis, como no Amazônico, Cerrado e Mata Atlântica, tornam difícil a reversão dos danos causados e, mesmo como domínio de soluções técnicas para a recuperação ambiental, não existe garantia de retorno dos níveis de qualidade ambiental existentes no período anterior a degradação (Araújo, 2008).

2.2 A Floresta Nacional do Jamari

A Amazônia constitui a maior faixa de floresta tropical do mundo, com mais de 3,3 milhões de km², uma área superior à somatória de todo o território da França, Itália, Espanha e Portugal.

Sua apropriação tem sido objetivo do governo brasileiro desde o século 19, devido à existência de abundantes recursos naturais, incluindo uma fauna e flora extremamente diversificada e reservas minerais abundantes, com jazidas de ferro, manganês, alumínio, cobre, zinco, níquel, cromo, titânio, fosfato, ouro, prata, platina, paládio, ródio, estanho, tungstênio, nióbio, tântalo, zircônio, urânio, e pedras preciosas, como diamantes, rubis e safiras (Santos, 2002; Pedlowski, 1997; Beurlen & Cassedanne, 1981; Barret, 1980).

Como consequência, o processo de ocupação da região gerou um grande fluxo de colonos, o que resultou em uma rápida remoção da floresta tropical, com significativos impactos regionais (Smith et al., 1991).

Particularmente a mineração na Amazônia, por envolver a extração e processamento de minerais, além da eliminação dos resíduos de rocha e subprodutos, têm ameaçado o ecossistema local.

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 (Philips, 2016; Gonçalves et al., 2013; Sousa et al, 2011; Portela e Rademacher, 2001; Smith, et al., 1991).

Porém, algumas atividades, como a mineração, possuem uma série de impactos socioeconômicos positivos que viabilizaram a exploração em território Amazônico.

Nesse contexto, 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 década de 70 (Beurlen e Cassedanne, 1981).

Atualmente, o Brasil ocupa a 5ª posição na produção mundial desse minério, tendo o Estado de Rondônia 25% de todas as reservas em exploração (IBRAM, 2012).

A Floresta do Jamari representa uma das regiões onde a mineração de estanho ocorreu e vêm ocorrendo. As primeiras incursões ao local se iniciaram nos anos 50, por seringueiros, garimpeiros de cassiterita e coletores de castanha do Pará, acessando o local pelo Rio Jamari.

Após a criação da Rodovia BR-364, nos anos 60, que liga Cuiabá (MT) a Porto Velho, as atividades de exploração se intensificaram, com ocupação das áreas próximas a Floresta do Jamari, e, nos anos 70, a mineração de cassiterita se intensificou, devido à viabilidade econômica proporcionada pelas grandes reservas e facilidade de acesso.

À medida que novas minas foram exploradas, ocorreu um aumento na taxa de ocupação, 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.

Em 1999, foi estabelecido o compromisso entre a empresa de mineração e o IBAMA para disciplinar a aplicação das medidas necessárias para mitigar os impactos negativos da mineração, bem como para regular a atividade de extração de minério de cassiterita nos domínios da Floresta nacional do Jamari, com o estabelecimento de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (IBAMA, 1999).

No acordo foi disponibilizado ao IBAMA orientações técnicas necessárias, além da metodologia de revegetação para as áreas degradadas. Nesse contexto, foi identificada, a necessidade de cooperação técnica ou científica com universidades ou centros de pesquisa nacionais e internacionais de maneira a avançar na problemática, envolvendo uma parceria com pesquisadores da Universidade Estadual de São Paulo - UNESP e Universidade de Campinas - UNICAMP, tendo em vista à reintegração das áreas mineradas a 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, plantio de leguminosas e plantio de espécies nativas.

Desde então 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; Longo et al, 2011; Ribeiro et al, 2004) e a aptidão dos locais em recuperação (Yada, et al., 2015. Longo et al, 2011a).

2.3 Recuperação de Áreas degradadas pela mineração: a falta de consenso

O conceito de recuperação de áreas degradadas foi tratado inicialmente como uma forma de transformação do uso da terra, através de ações de modificação ambiental, com foco em tornar o meio mais adequado às atividades humanas, para a criação de novas áreas agrícolas, industriais e espaços de assentamento (Vanicek, 1977; Goldstein e Smith, 1975).

Posteriormente, na mineração, Tomlinson (1984) entendeu a recuperação como o processo de retribuição de alguma forma de uso aceitável ao ambiente minerado, sendo o termo restauração utilizado como a substituição do solo e criação de um novo tipo substrato. No mesmo período, Bradshaw (1984), atribuiu os conceitos ao processo de restabelecimento de florestas em ambientes minerados, utilizando uma abordagem voltada para a ecologia local.

Em Bradshaw (1997) os conceitos de recuperação de áreas degradadas (*Land Reclamation*) objetivando a recuperação de solos degradados, foram apresentados em três desdobramentos principais: [1] Restauração: associado com o retorno do meio à sua condição original; [2] Reabilitação: parcial retorno as condições originais; [3] Recuperação: obtenção de uma nova condição, com estrutura e funções diferenciadas da condição natural, ocorrendo em situações onde a ocorreu substituição do solo, como no processo de mineração, porém com retorno das condições biológicas do solo.

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.

Para Stanturf et al. (2014) a restauração florestal ainda se divide em múltiplos objetivos, que são definidos pelos agentes ambientais e sociais envolvidos. Portanto, o conceito de restauração ainda poderia, conforme os Autores, ser subdividido em quatro abordagens principais: [1] Reabilitação: recomposição da diversidade de espécies, estrutura, ou processos ecológicos em um ambiente degradado; [2] Reconstrução: recomposição de espécies nativas e locais com outras formas de uso e ocupação da terra, como agricultura; [3] Recuperação: restauração de locais sujeitos a severas alterações ambientais, como áreas degradadas pela mineração, geralmente sem cobertura vegetal; [4] Substituição de espécies: alteração das espécies devido a mudanças climáticas.

Já Lima et al. (2016), recentemente, propôs outra revisão, onde o conceito de recuperação de terras é composto pelo que os Autores denominam de programa 4R. Seus componentes principais foram definidos como: [1] Remediação: tem por objetivo a descontaminação do meio, de maneira a que não ofereça mais risco a saúde humana; [2] Restauração: processo que busca o retorno ao estado original; [3] Recuperação: similar à restauração, porém, busca a restauração de um componente sistêmico do meio, como as funções bioquímicas. Pode não utilizar a composição exata de espécies existentes no sistema natural, mas algumas com função similar, e o final do processo de recuperação ocorre quando há a substituição do meio degradado por outro que apresente algumas funções ecológicas; [4] Reabilitação: definido como um termo gerencial que mede os custos e benefícios da manutenção da qualidade ambiental e aperfeiçoa a capacidade de gestão do território local, incluindo práticas como a agricultura, silvicultura, urbanização, etc.

No Brasil, Leifelder et al. (2015), após a revisão de uma série de definições e conceitos na literatura nacional, internacional e com base na legislação brasileira, entendeu que, dada a própria natureza da atividade de mineração, com grandes mudanças no ambiente natural, à recuperação de áreas degradadas, em última análise, é a recuperação da capacidade produtiva dos solos, em uma tentativa de fornecer uma nova utilização, sustentável, para a área após o fim das atividades de mineração.

Ma et al. (2013), a partir de uma série de estudos de caso na China, ainda complementa a análise de Leifelder et al. (2015), concluindo que como a ecologia da restauração de ambientes degradados envolverá processos complexos, que afetam vários componentes do ambiente, tais como mudanças de biomassa, ciclagem de

nutrientes, material de fluxos, e muitos outros, que poderão ocorrer ao longo de décadas e, possivelmente, até mesmo séculos. Assim, a restauração irá ocorrer, se possível, em escalas de tempo longas, com necessidade de acompanhamento em longo prazo em comunidades ecológicas e humanas, mesmo depois que o projeto de restauração foi implementado, o que pode ser inviável, considerando a escala da vida humana.

Recentemente, o termo restauração ecológica tem adquirido um maior destaque. De acordo com a Sociedade Internacional de Restauração Ecológica, o termo remete ao processo de auxílio à restauração de um ecossistema degradado, danificado ou destruído (SER, 2004). De acordo com Halme, et al. (2013) essa terminologia é guiada por duas questões centrais principais, o retorno do ecossistema degradado a uma condição preliminar e a segunda a necessidade de adoção de métodos adaptativos de gestão para atingir os objetivos propostos, aspectos que dificultam seu emprego na recuperação de áreas degradadas pela mineração. Porém, a possibilidade de estabelecimento de ecossistemas de referência, não necessariamente similares aos originais, e, inclusive, idealizados, que podem permitir a adoção dessa terminologia no processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração.

Ainda, em uma revisão sobre a restauração de florestas de elevada biodiversidade no Brasil, Rodrigues et al. (2009) entendem que o termo restauração florestal pode ser entendido, num período mais recente, como ações voltadas para o desenvolvimento florístico e diversidade genética intraespecífica, necessários ao desenvolvimento e manutenção florestal. Portanto, englobando técnicas que apenas poderiam ser empregadas após ações de remediação, reabilitação e (ou) recuperação para locais minerados.

2.4 Recuperação de Áreas degradadas pela mineração: avaliação e aptidão

Apesar de não existir um consenso na terminologia de recuperação de áreas degradadas e diversas terminologias serem utilizadas, para objetivos diferenciados, ou similares, há alguma uma convergência conceitual em como o processo de recuperação pode ser avaliado.

Grande parte dos estudos se alinham com a abordagem de Lima et al. (2016), onde se considera que o progresso do processo de recuperação deve considerar

programas que contemplem modificações ao longo do tempo nas características, processos e fluxos bioquímicos, microbiológicos, hidrológicos, na biodiversidade e no transporte de contaminantes, baseado numa definição clara dos objetivos da recuperação e seus respectivos indicadores de desempenho.

Ainda, Stanturf et al. (2014) e Halme, et al. (2013) entendem que no processo de restauração florestal e (ou) ecológica, uma forma de simplificar a avaliação dos locais em recuperação é sua comparação com um ambiente de referência, ou algumas de suas propriedades, que podem incluir: tamanho das árvores, composição dossel, resíduos lenhosos, estrato herbáceo, briófitas e corticosos, fungos, animais selvagens, área florestal, e outros disponíveis.

Já Wang et al. (2011), considera que a recuperação de áreas degradadas pela mineração apresenta um aspecto de multi-aptidão, dado que um local recuperado deveria, em tese, apresentar diferentes tipos de aptidão, associadas às diferentes componentes do meio e do ecossistema. A escolha dos métodos de avaliação também deve ser determinada pelas condições locais, e pode afetar diretamente o resultado final do processo de recuperação.

Assim, conforme os Autores propuseram, cinco abordagens principais poderiam ser consideradas: [1] condições limitantes, onde é determinado um padrão mínimo de qualidade, com base nas expectativas no processo de recuperação, onde o final do processo de recuperação dependerá da qualidade ambiental do local com condições mais adversas, ou insatisfatórias; [2] soma de índices: avalia a aptidão da área em recuperação através de índices que integram vários componentes do meio; [3] método *extenics*, utilizado para a solução de problemas de natureza qualitativa e quantitativa utilizando ferramentas e métodos estatísticos; [4] Abordagens Fuzzy, emprego da lógica *Fuzzy* na incerteza no processo de reconhecimento da qualidade ambiental; [5] Decisão por Redes Neurais Artificiais, utilização de métodos baseados o funcionamento do cérebro humano para o estabelecimento da relação entre a aptidão ambiental de áreas em recuperação e seus fatores de impacto.

Nesse contexto, diversos Autores têm conduzido estudos, que, em sua maioria utilizam as abordagens citadas isoladamente, ou em conjunto, a exemplo: método de condições limitantes (Lei et al., 2016; Li et al., 2007; Parrota e Knowles, 2000; Parrota et al., 1997), análise de componentes principais, conforme o método de soma de índices e *Extenics* (Mukhopadhyay et al. 2016; Mukhopadhyay et al. 2014; Mukhopadhyay et al. 2013), mesclando ferramentas de avaliação, com Análise

Multicritério (Soma de Índices) e Abordagens Fuzzy (Elaalem, 2013), Análise Hierárquica de Processos e Lógica Fuzzy (Feng et al., 2014), e Redes Neurais Artificiais, com aplicação de mapas de Kohonen (Ribeiro, et al., 2016).

3 MINERAÇÃO DE DADOS

3.1 Conceituação: Mineração de dados ou Conhecimento por Descoberta?

Embora técnicas de mineração de dados sejam amplamente difundidas em diversas áreas do conhecimento, há uma disparidade entre as diferenças conceituais entre a mineração de dados (Data Mining - DM) e o conhecimento por descoberta em banco de dados (*Knowledge Discovery in Databases* - KDD).

Para Feelders et al. (2000) o processo de mineração de dados envolve a organização e descoberta de informação que são importantes para atividades e processos, constituindo um campo multidisciplinar que envolve os campos do conhecimento da estatística, automação, gestão da informação e de visualização de dados. Os autores ainda entendem que o KDD representa algo maior que a mineração de dados propriamente dita, envolvendo desde a formulação do problema até a modelagem e obtenção de resultados.

Já Baker (2010) entende a mineração de dados como o campo de descoberta de informação útil em grandes conjuntos de dados, como um sinônimo da descoberta de conhecimento em bancos de dados. Porém, concorda com seu caráter multidisciplinar, expondo sua aplicação em diversos campos do conhecimento incluindo vendas, bioinformática, até contraterrorismo.

Dzeroski (2008), em uma revisão sobre as principais metodologias e algoritmos com potencial para estudos de cunho ambiental, em alinhamento conceitual com Feelders et al. (2000), concorda que o KDD deve ser entendido como algo sistêmico. Enquanto a mineração de dados constitui uma etapa central do KDD, constituída principalmente pela aplicação de técnicas computacionais para determinação de padrões, a KDD apresenta outras duas etapas principais, consideradas para preparar os dados para o processo de mineração e posteriormente avaliar os padrões e resultados obtidos.

Em trabalhos recentes Phridviraj e Gururao (2014), que realizam o estudo das novas perspectivas frente ao processo de mineração de dados, e Lausch et al. (2015), que realiza uma revisão sobre aplicabilidade da mineração de dados nas pesquisas de cunho ambiental, em termos conceituais, apresentam concordância com Baker (2010), entendendo a mineração de dados e o KDD como sinônimos.

Entretanto, retornando ao passado, na revisão realizada por Frawley et al. (1992), em momento onde os conceitos estavam sendo lançados, com primeiro workshop sobre KDD ocorrendo em 1989 (Fayyad et al., 1996), o conhecimento por descoberta em banco de dados (KDD) foi abordado tomando uma visão sistêmica, com definição “*a extração de informação implícita, não trivial, desconhecida a priori e potencialmente útil a partir dos dados*”, similar às definições de mineração de dados dadas por alguns Autores na bibliografia atual.

Porém, Frawley et al. (1992) não mencionam a mineração de dados, apenas descrevem o que chamam de Algoritmos de Descoberta (*Discovery Algorithms*) como uma etapa do KDD, sendo constituída por procedimentos delineados para extrair conhecimento a partir dos dados, através de dois processos principais: identificação de padrões e simplificação da informação.

Já Fayyad et al. (1996), em uma revisão relacionado o conceito de mineração de dados com o KDD, entendem a mineração de dados com uma etapa do processo de conhecimento por descoberta, em que ocorre pela aplicação de algoritmos para extração de padrões dos dados. A diferença entre KDD e mineração de dados é discutida no sentido de tomar o processo KDD como sistêmico, abrangendo a preparação dos dados, sua seleção, limpeza, incorporação de conhecimento a priori, e apropriada interpretação dos resultados da etapa de mineração, sendo essencial que o conhecimento derivado dos dados seja assegurado.

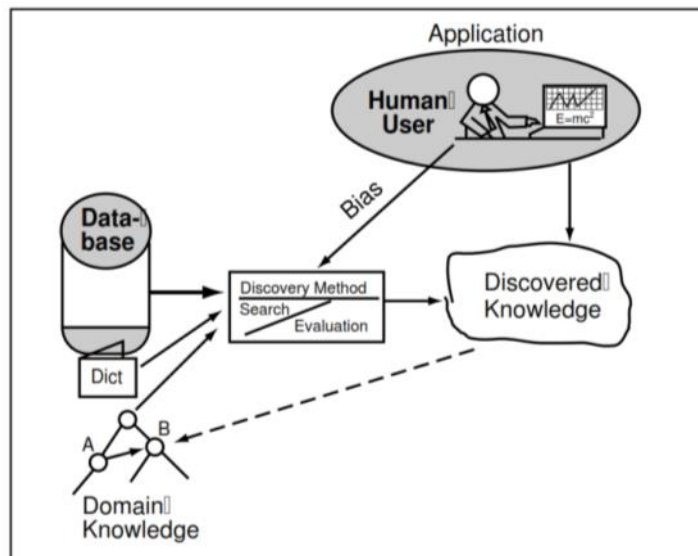
3.2 Principais Etapas no conhecimento por descoberta em bancos de dados

Em Frawley et al. (1992) um protótipo sistêmico de conhecimento por descoberta em banco de dados (KDD) foi apresentado, como a interação entre três elementos principais e dois tipos de conhecimentos, o de domínio e o de descoberta (Figura 2).

O elemento central representa o método de descoberta, responsável por computar e avaliar os padrões para construção do conhecimento. As entradas do sistema são constituídas por: [1] banco de dados, que contém a informação bruta; [2] pelo conhecimento de domínio, que representa o conhecimento existente, a priori, acerca do que se conhece sobre os dados e sobre fenômeno em avaliação; [3] objetivos, que são definidos pelo usuário e orientam todo o sistema.

Como saída o conhecimento descoberto pode ser direcionado ao usuário, finalizando o processo, ou retornar ao sistema como conhecimento de domínio, para realização de uma nova análise.

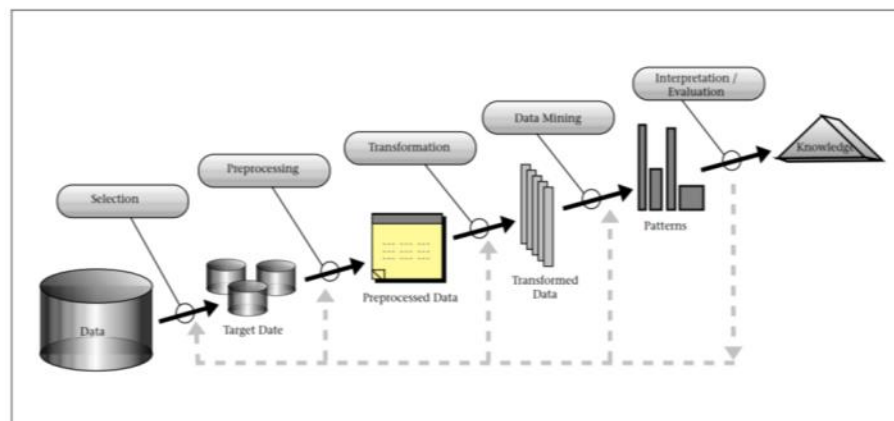
Figura 2 – Fluxograma da Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados.



Fonte: Frawley et al. (1992).

Em Fayyad et al. (1996) é possível identificar o desenvolvimento conceitual, com maior nível de detalhe, incorporando no sistema KDD outros elementos, como a etapa de mineração de dados (Figura 3).

Figura 3 – Revisão do Fluxograma da Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados.



Fonte: Fayyad et al. (1996).

No sistema apresentado por Fayyad et al. (1996) nove etapas principais são propostas, compreendidas por: [Etapa 1] compreensão do conhecimento a priori e dos objetivos do processo de conhecimento por descoberta, com definição dos resultados esperados e busca de informações de domínio acerca dos dados; [Etapa 2] processo de amostragem e seleção das variáveis e dados que serão analisadas ao longo do processo, de maneira a contemplar os objetivos e tendo como suporte o conhecimento a priori; [Etapa 3] limpeza e pré-processamento dos dados, através da eliminação de ruídos, dados espúrios e modelagem; [Etapa 4] redução dos dados e projeção, busca da redução da dimensionalidade dos dados, busca de indicadores ou variáveis representativas através de métodos de transformação; [Etapa 5] busca do método de mineração adequado aos objetivos; [Etapa 6] seleção da análise exploratória, modelagem e hipóteses, com seleção do algoritmo de mineração de dados, modelos e parâmetros compatíveis com a necessidade de entendimento definida na Etapa 1; [Etapa 7] mineração de dados, com análise e busca de padrões de interesse, representações, classificações, regras, regressões, etc.; [Etapa 8] interpretação dos resultados da mineração de dados, envolvendo a visualização dos padrões e resultados, além da possibilidade de retornar as Etapas 1 ou 7 para reavaliação, caso o objetivo não tenha sido atendido; [Etapa 9] validação e difusão do novo conhecimento: representa a incorporação do conhecimento gerado, checagem e resolução de potenciais conflitos entre o conhecimento a priori e o resultante do processo de conhecimento por descoberta.

Feelders et al. (2000), em concordância com Fayyad et al. (1996), complementam com o destaque de quatro pontos principais que direcionam todo o processo de conhecimento por descoberta: [1] A importância na seleção do método de mineração de dados que possibilite abordar de forma sistêmica o estudo, desde a formulação do problema, até as ações de modelagem e avaliação da efetividade do processo; [2] A forma de aquisição dos dados e o entendimento da necessidade de informação para o usuário final; [3] A necessidade da escolha do delineamento estatístico adequado às características dos dados disponíveis, com maleabilidade para aceitação, ou correção, de anomalias, dados espúrios e dados ausentes; [4] A utilização de ferramentas que permitam a simplificação dos dados a resultados de fácil interpretação e entendimento do conjunto de dados.

Ainda, detalham o processo de mineração de dados em sete principais etapas principais (Tabela 1).

Tabela 1- Descrição das principais etapas do processo de mineração de dados.

Etapas da mineração de dados	Objetivos e descrição
1. Formulação do problema (<i>Problem formulation</i>)	Representa a etapa de identificação do objetivo do processo de mineração de dados, da necessidade de identificação dos padrões e dos relacionamentos que atenderão os objetivos. Nessa etapa definem-se para qual fim os resultados serão utilizados.
2. Identificação das competências necessárias (<i>Identification of background knowlege</i>)	Os bancos de dados não são comumente criados com o propósito de atendimento a delineamentos estatísticos e experimentais. Nesse sentido, é importante identificar quais tipos de delineamento podem ser utilizados no processo de mineração de dados frente a características dos dados existentes. Outro aspecto a ser considerado são os modelos matemáticos, probabilísticos e estatísticos que podem ser necessários, dadas as características dos dados e os objetivos almejados.
3. Seleção dos dados (<i>Selection of data</i>)	É necessária a decisão de quais dados podem ser relevantes para o atendimento dos objetivos. A escolha deve ser realizada com base na percepção do próprio analista, no entendimento da importância das variáveis, consistência dos dados e disponibilidade.
4. Pré-processamento dos dados (<i>Pré-processing the data</i>)	Constituí uma das etapas que mais consomem tempo na mineração de dados. Representa a etapa, onde após a seleção dos dados que apresentam potência para a análise, são pré-processados de maneira a adequá-los e prepará-los para a análise final.
5. Derivação de novos atributos (<i>Deriving new attributes</i>)	Representa o processo de transformação dos dados primeiros em dados secundários, principalmente através da expertise do analista. O processo de transformação possibilita a simplificação da informação, facilitando sua posterior análise.
6. Agregação (<i>Aggregation</i>)	Nessa etapa a ocorre uma última simplificação dos dados (agregação) de maneira a agrupar entidades semelhantes para diminuição do tempo de processamento na etapa posterior.
7. Análise e interpretação (<i>Analysis and Interpretation</i>)	Nessa etapa os dados já preparados e simplificados são analisados pelo modelo já definido gerando os resultados que serão avaliados pelo analista.

Fonte: Feelders et al. (2000).

Phridviraj e Gururao (2014) ainda acrescentam três conceitos ligados à forma de organização dos dados, que permitem sua caracterização e a identificação das técnicas de mineração e processamento adequadas: [1] Bancos de dados (*data bases*): representam os dados estruturados de forma compatível ao processamento;

[2] Armazém de dados (*data warehouse*): constitui os dados não organizados e brutos, de forma a exigir uma etapa preliminar à mineração de dados, denominada pelo autor de Limpeza de Dados (*Data Cleaning*), para eliminação de ruídos e dados espúrios; [3] correntes de dados (*data streams*), representam dados com dimensão contínua, de séries temporais ou com postos, obtidos continuamente através de sensores e de forma automatizada.

3.3 Técnicas de mineração de dados e aplicações ambientais

Baker (2010), em estudo da mineração de dados no contexto da avaliação de desempenho educacional, agrupa as técnicas de mineração de dados em cinco abordagens principais (Tabela 1). As primeiras três categorias representam-se, segundo o autor, com aplicabilidade geral, enquanto as duas últimas mais direcionadas ao campo educacional.

Em termos de estudos ambientais Dzeroski (2008) agrupa as técnicas de mineração de dados em: [1] classificação e regressão: busca prever o valor de um atributo através dos valores de outros atributos. O atributo de interesse normalmente é denominado variável dependente e os atributos preditores de variável independentes. Dois processos são utilizados sob essa abordagem, o treinamento, que busca através de dados de entrada modelar a relação dos atributos preditores e de interesse, e validação, onde parte dos dados é reservada para estimar o desempenho. [2] Clustering: tem por finalidade agrupar objetos em classes homogêneas. Um cluster de objetos possui elementos homogêneos entre si, porém diferenças quando comparado a objetos de outros clusters. Normalmente esses métodos são baseado em medidas de similaridade e distância entre objetos, que busca maximizar a similaridades de objetos em um cluster, e a mínima similaridade entre clusters. [3] Análise de associação: nessa análise há a busca da identificação no relacionamento de atributos, por medidas de correlação, covariância e outras. Normalmente a análise é realizada em duas etapas, na primeira é determinada qual o grau de associação entre os atributos. Na segunda o nível de confiança existente. [4] Identificação de padrões: busca simplificar um conjunto de dados para representações úteis, que podem ser visualizadas e entendidas. Normalmente resulta em uma simplificação do conjunto total de dados, resultando em alguns fatos sobre os dados. [5] Equações: envolve a utilização de equações lineares ou não

lineares para descrição de fenômenos a partir de um conjunto de dados. [6] Árvores de decisão: consistem em estruturas hierárquicas, compostas por redes de nós, onde cada nó testa um atributo e gera um resultado, encaminhado para outro nó. As árvores de decisão podem apresentar dois objetivos principais, de classificação e regressão.

Tabela 2- Descrição dos objetivos dos métodos de mineração de dados utilizados no ambiente educacional e em outras áreas de conhecimento.

Categoria do método	Objetivo do método
Predição (<i>Prediction</i>)	Desenvolver um modelo que possibilite inferir um único aspecto (variável dependente) através da combinação de outros aspectos do conjunto de dados (variáveis independentes). Porém o método requer que a seja possível verificar a veracidade da informação utilizada na construção da variável dependente, sendo em alguns casos, necessário verificar se o grau de veracidade das variáveis permite a inferência sob um único aspecto, ou não.
Agrupamento (<i>Clustering</i>)	No agrupamento o objetivo é identificar nas unidades de dados informações que naturalmente se agrupam, dividindo o conjunto de dados em grupos. Esse método é particularmente útil em casos onde as categorias mais comuns do conjunto de dados não é conhecida a priori. Se o conjunto de grupos é otimizado, nas categorias, cada unidade de dados, será similar as outras unidades de dados que ocupam a mesma categoria, sendo heterogêneas as unidades que ocupam outras categorias.
Mineração de relacionamento (<i>Relationship mining</i>)	Na mineração de relacionamento o objetivo é descobrir o relacionamento entre as variáveis em conjuntos de dados com um grande número de variáveis, permitindo identificar quais variáveis apresentam maior associação com uma única variável de maior interesse, ou descobrir qual par de variáveis apresentam maior grau de relacionamento. Existem quatro tipos principais de mineração por relacionamento: mineração por regra de associação (<i>Association rule mining</i>), mineração por correlação (<i>Correlation mining</i>), mineração por padrão sequencial (<i>Sequential pattern mining</i>) e mineração casual de dados (<i>Casual data mining</i>). Na mineração por regra de associação o objetivo é descobrir as regras SE-ENTÃO (if-then) de maneira que se os valores de um conjunto de variáveis são identificados, outras variáveis assumirão valores específicos. Na mineração de correlação o objetivo é identificar as correlações lineares (positivas ou negativas) entre as variáveis. Na mineração por padrões sequenciais, o objetivo é identificar associações temporais entre eventos. Na mineração casual de dados o objetivo é identificar quando um evento foi causado por outro evento, pela análise de covariância entre eventos, ou pela utilização de como o evento é desencadeado.
Descoberta por modelagem (<i>Discovery with models</i>)	Na mineração de dados de descoberta por modelagem o modelo de um fenômeno é desenvolvido através da predição, agrupamento, ou, em alguns casos, pelo conhecimento de engenharia. Esse modelo é utilizado como componente de outros tipos de análise como a mineração de dados por predição ou por relacionamento. Nesse caso em particular o modelo determinado é utilizado como preditor das variáveis, transformando-as em novas variáveis que possibilitam a inferência sobre o fenômeno.
Destilação de dados para julgamento humano (<i>Distillation of data for human judgment</i>)	Esse modelo baseia-se na inferência humana sobre os dados, sendo um método fora do âmbito de métodos totalmente automatizados. O método se baseia na aquisição de informação por visualização. Os dados são destilados pelo julgamento humano com dois propósitos principais: a identificação e classificação. Quando os dados são destilados pela identificação, eles são disponibilizados de maneira a permitir a fácil identificação de padrões que são impossíveis ou de difícil expressão formal, a exemplo a análise gráfica. Já a destilação por classificação, para dar suporte a posteriores modelos de predição, os dados são apresentados visualmente e classificados de acordo com a percepção do agente humano. Normalmente os resultados são utilizados na construção de modelos preditivos de classificação.

Fonte: Baker (2010).

Lausch et al. (2015), de forma similar, entende as técnicas de mineração de dados em seis grupos principais (Tabela 3), com quatro métodos principais de análise com aplicações ambientais: [1] Análise de associação e sequencial (*Association and sequence analysis*), que busca o entendimento entre a associação e interações entre o conjunto de dados; [2] Agrupamento (*Grouping and clustering*), busca agrupar os dados de maneira a manter em um grupo a maior homogeneidade possível e entre grupos a maior heterogeneidade possível; [3] Regressão

(*Regression*), busca estimar o prever variáveis a partir das relações lineares e não lineares existentes nos dados; [4] Classificação (*Classification*), busca a classificação dos dados em classes pré-determinadas através de funções de classificação geradas a partir de redes neurais artificiais (*Artificial neural networks*), árvores de decisão (*Decision trees*) ou análise discriminante (*Discriminant analysis*).

Tabela 3 - Tipos de mineração de dados com potencial para aplicação em estudos ambientais.

Tipo de mineração de dados	Descrição
Mineração de texto (<i>Text Mining</i>)	Esse grupo inclui algoritmos de análise vocabular e gramatical, onde o texto é fragmentado em estruturas específicas e padrões são identificados, agrupados e classificados pelos métodos de mineração de dados.
Mineração da Web (<i>Web-mining</i>)	Representa a aplicação de métodos de mineração de dados a informações compiladas da internet. Existem três tipos de Mineração da Web: [1] Mineração de conteúdo (<i>Web content mining</i>), que consiste na mineração do conteúdo de páginas da Web; [2] Mineração da estrutura da Web ou de relacionamento (<i>Web structure or relationship mining</i>), analisa o relacionamento entre os hiperlinks de páginas da internet; [3] Mineração do uso da internet (<i>Web usage mining</i>), que representa a análise da relação entre o usuário e páginas da internet.
Mineração de imagens (<i>Image-mining</i>)	A mineração de imagens tem por objetivo, através das técnicas de mineração de dados, analisar e extrair padrões não explícitos. A extração de padrões é realizada por um conjunto de técnicas que envolvem o reconhecimento de cor, textura, forma, distância e intensidade das imagens.
Mineração de séries temporais (<i>Mining of time series data</i>)	É realizado o estudo do relacionamento temporal dos dados de maneira a reconhecer diferenças ao longo do tempo e a associação entre essas diferenças e o tempo.
Mineração de dados espaciais (<i>Spatial data mining</i>)	O propósito da mineração de dados espaciais é desvendar padrões em conjuntos de dados multidimensionais, com elevado volume, provenientes de sensoriamento remoto.

Fonte: Lausch et al. (2015).

3.4 Detalhamento do sistema de conhecimento por descoberta em banco de dados empregado no estudo

3.4.1 *Área em estudo e principais características dos locais minerados*

A Floresta Nacional do Jamari (FLONA do Jamari), administrada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Minerais Renováveis – IBAMA, está situada a 90 km da cidade de Porto Velho – RO. 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 Distrófico bem drenado franco pedregoso com manchas de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico bem drenado argiloso muito pedregoso (IBAMA, 2005). O clima da região é quente e úmido, com temperaturas médias de 24°C. A precipitação pluvial anual é de 2550 mm, com máximas de dezembro a março. A umidade relativa do ar se mantém entre 80% a 85%, havendo uma estação seca bem definida, de julho a agosto.

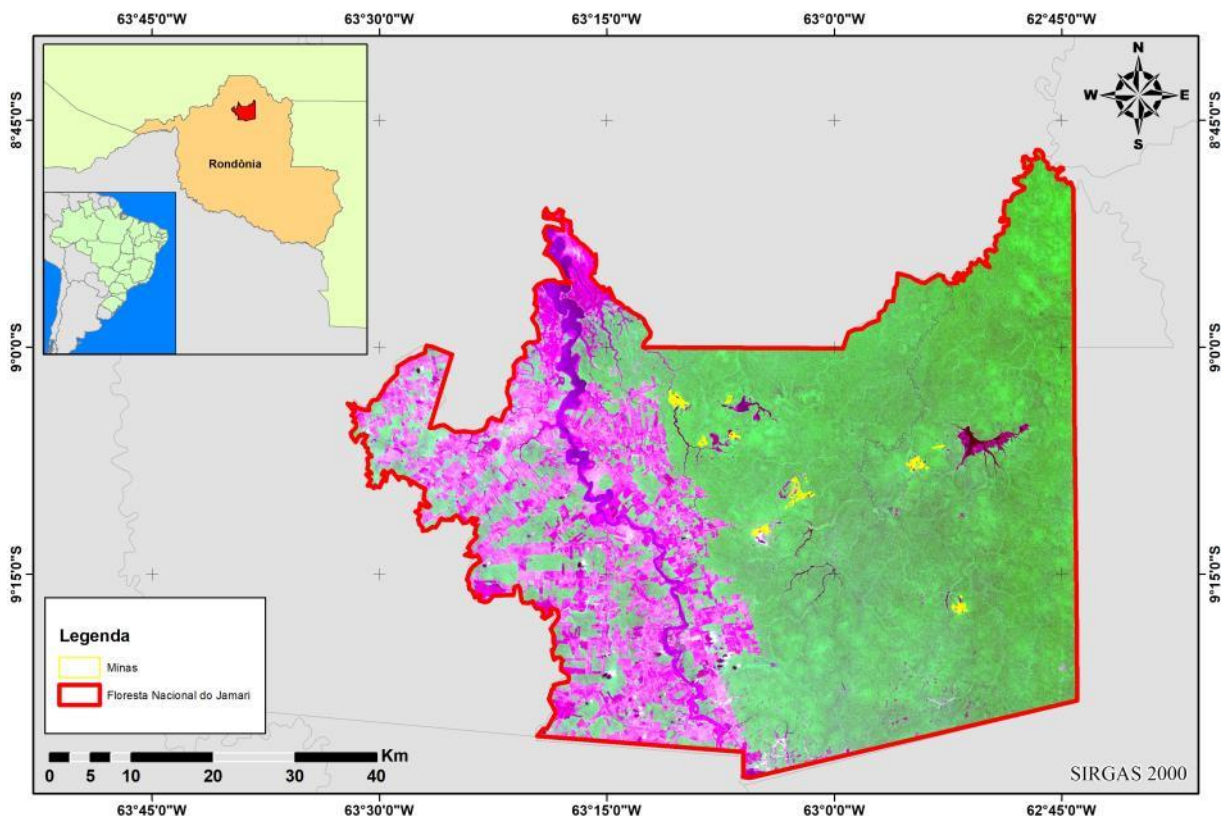
O estudo foi desenvolvido em sete minas desativadas (Figura 4), utilizadas anteriormente exploração de cassiterita, que foram recuperados desde os anos 90, visando à reintegração à paisagem dominante da Amazônia.

Devido à heterogeneidade do solo minerado, preliminarmente a preparação do local e estabelecimento das ações, foi realizado um zoneamento ambiental dos locais minerados, através da avaliação de dano ambiental (Ribeiro et al., 2015).

Todos os substratos foram classificados de acordo com suas características físicas e químicas, em três principais zonas ambientais (Ribeiro et al., 2015):

[1] Piso de Lavra: solo-substrato obtido através de operações de movimentação de terra, em situações como exposição das encostas, construção de taludes, estradas de acesso, e outras operações que requerem escavação, remoção ou aterro do solo superficial.

Figura 4 – Localização da área em estudo.



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

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

[2] Rejeito (seco e úmido): substrato formado por uma massa heterogênea de material, proveniente do preenchimento de locais de remoção de minério. Essas áreas foram preenchidas com sedimentos, drenados ou parcialmente drenados, com tamanho de grão variável, sujeito a inundações e desprovido de matéria orgânica. As características deste substrato dependem das propriedades físicas e geoquímicas da rocha matriz, em geral pobres em nutrientes e com efeito adverso ao crescimento vegetal.

[2.1] O rejeito seco se localiza na região próxima a barragem de contenção, constituído predominantemente por material arenoso, apresenta pouca ou nenhuma estrutura do solo, fertilidade natural baixa ou muito baixa, capacidade de drenagem excessiva e baixa capacidade de retenção de água.

[2.2] O rejeito úmido se localiza afastado do local de contenção da barragem, geralmente próximo aos cursos de água. Sua constituição é de material fino, com predominância de argila e, devido à sua proximidade de cursos de água, pode permanecer inundado parte do ano.

[3] Rejeito capeado: substrato formado pela cobertura do rejeito com solo superficial (*top soil*). O solo superficial foi fornecido por outros locais em processo de abertura de cava para mineração, contendo matéria orgânica e o banco de sementes.

Posteriormente, foram implementadas ações, incluindo a reconstrução topográfica, reestruturação da drenagem e preparo do solo, utilizando compostagem associada à adubação verde, fertilizantes químicos e calagem, com a revegetação utilizando espécies nativas e exóticas, conforme documentado em Ribeiro et al. (2015), Yada et al. (2015), Longo et al. (2011) e Ribeiro (2005).

3.4.2 Coleta de dados e análises

As áreas em recuperação na FLONA do Jamari apresentaram dados de análises realizadas no período entre 2010 a 2016, disponibilizados pelo convênio entre a companhia mineradora com a UNESP (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho) e UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas). As amostragens foram realizadas anualmente, em parcelas de 50 x 50 metros, distribuídas nas minas em recuperação. As variáveis disponíveis estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis disponíveis para estudo.

Meio	Dimensão	Variáveis	Unidade	Data de coleta
Físico	Físicas	Granulometria	%	2011
		Porosidade	%	2014
		Densidade aparente	g/cm ³	2014
		Diâmetro Médio Geométrico	mm	2014
	Químicas	Matéria Orgânica	g dm ⁻³	2010-2014
		pH	CaCl ₂	2010-2014
		K		2010-2014
		Ca		2010-2014
		Mg		2010-2014
		H+Al	mmolc/dm ³	2010-2014
		SB		2010-2014
		CTC		2010-2014
		V	%	2010-2014
		Umidade	105 °C	2010-2014
	Bioquímicas	Capacidade de Retenção de Água	%	2010-2014
		Respiração Basal	mg CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹	2010-2014
		Carbono da Biomassa Microbiana	mg C kg ⁻¹	2010-2014
		Desidrogenase	mg TFF kg ⁻¹ h ⁻¹	2010-2014
		Celulase	mg glicose kg ⁻¹ h ⁻¹	2010-2014
		C-orgânico	%	2010-2014
		Coeficiente Metabólico	mg CO ₂ /g CBM*h	2010-2014
Biótico	Vegetação	Idade de plantio	Anos	2010-2014
		Regeneração natural arbórea	Indivíduo/ha	2010-2014
		Densidade de Indivíduos arbóreos	Indivíduo/ha	2010-2014
		Área Basal	m ² /ha	2010-2014
		Altura média do dossel	m	2010-2014
		Riqueza média por parcela	Espécie/ha	2010-2014
		Altura de serrapilheira	m	2014
	Fauna	Riqueza de espécies da macrofauna	Espécie	2014

3.4.3 Estrutura do sistema de conhecimento por descoberta em banco de dados

Os dados disponíveis foram submetidos a quatro etapas de processamento (Figura 5). Inicialmente, na Etapa 1, foi realizada a seleção dos dados de interesse, bem como a amostragem das áreas em recuperação e variáveis com histórico completo de dados.

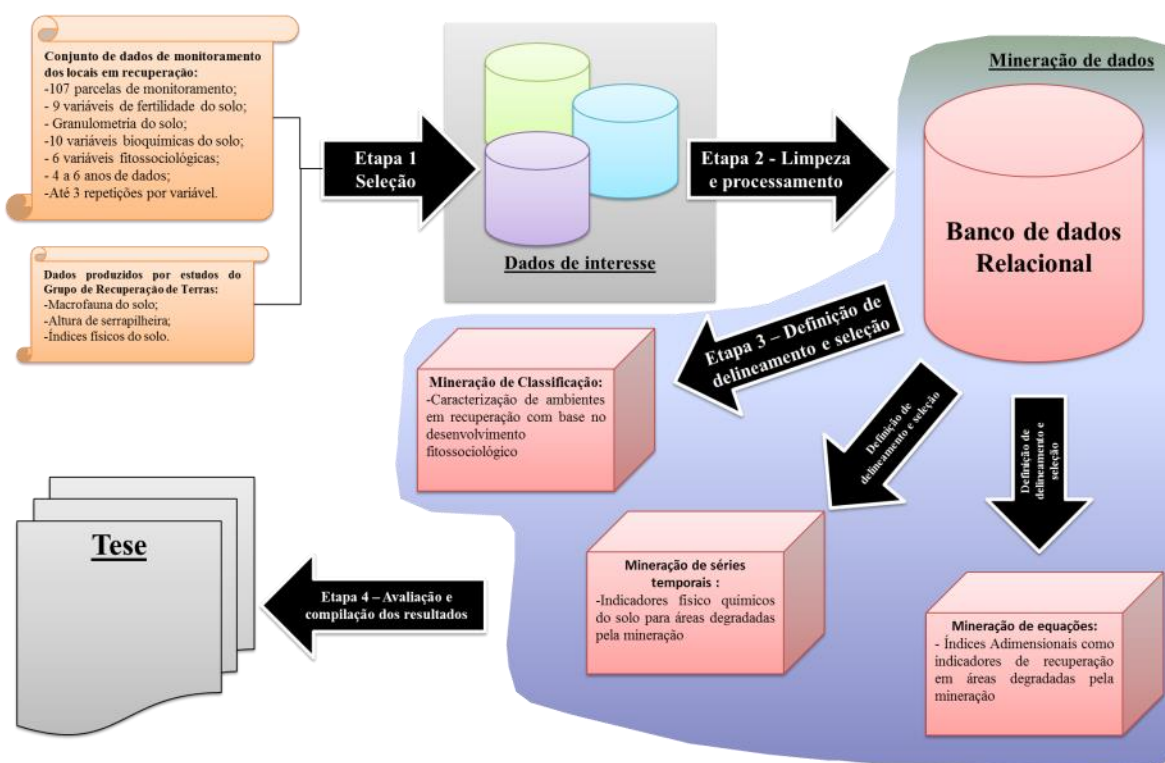
Na segunda etapa foi realizada a análise exploratória dos dados, bem como a verificação da sua consistência. As variáveis bioquímicas e de fertilidade apresentavam três repetições para cada parcela, sendo realizada a análise dos histogramas de cada variável e o estudo de extremos, para checagem e correção dos valores das repetições, além da análise dos valores do coeficiente de variação e análise de Box plot. Na obtenção de um valor que excedia a variabilidade esperada (*outlier*), realizou-se sua substituição pelo valor médio das outras repetições.

Realizou-se a verificação do comportamento da variável ao longo do tempo, por meio dos gráficos de Box plot (média e desvio padrão), de cada variável, para cada ano de coleta, tomando todas as repetições.

Como as variáveis fitossociológicas não apresentavam repetições, em sua avaliação empregou-se o estudo de regressão, com análise do Coeficiente de Determinação (R^2) e tendências.

As variáveis que apresentaram período de coleta de apenas um ano, foram analisadas através da Análise de Variância (ANOVA), através do teste Tukey, comparando cinco tratamentos, definidos pelo Ecossistema de Referência, Áreas em Recuperação em diferentes níveis de ações e Piso de Lavra de uma mina em operação. As variáveis que possibilitaram a diferenciação dos tratamentos foram elencadas como potenciais indicadores de recuperação.

Figura 5 – Estrutura empregada na elaboração do estudo.



Na terceira Etapa todos os dados de interesse foram organizados em um banco de dados relacional, utilizando o programa Microsoft Access. Posteriormente, na Etapa 3, foram definidos os delineamentos para a realização dos estudos de Classificação dos ambientes em recuperação com base na resposta vegetal; Identificação dos indicadores de recuperação com base nas variáveis físico, química e microbiológicas, além da determinação de Índices de recuperação através da Análise Dimensional.

Todas as análises estatísticas e produções gráficas foram realizadas tomando os programas: Microsoft Excel; Assistat, versão 7.7 (Silva, et al. 2016); Programa R, versão 3.3.2 (R Core Team 2017) e Bioestat, versão 5.3 (Ayres et al. 2007).

4 CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES EM RECUPERAÇÃO COM BASE NO DESENVOLVIMENTO FITOSSOCIOLÓGICO ^a

4.1 Introdução

A mineração de superfície é responsável por significativas alterações ambientais. Para acesso, processamento e remoção do minério há a necessidade de cortes e aterros no terreno, além da utilização de processos mecânicos e químicos para a extração do minério de interesse. Como resultado, há uma significativa alteração da paisagem, que assume características muito diferenciadas em relação ao ambiente original (Mukhopadhyay et al., 2014).

Portanto, um grande esforço é necessário para a restauração dos ecossistemas preliminarmente existentes (Parrotta e Knowles, 2001). Porém, mesmo com um criterioso planejamento de ações no escopo da recuperação ambiental, os diferentes níveis de descaracterização da paisagem, aliados ao dano ambiental causado pela mineração, criam situações de difícil previsibilidade sobre as expectativas com o processo de recuperação ambiental. Assim, o novo ambiente formado nem sempre assume as características pré-estabelecidas, podendo apresentar uma condição muito diferenciada do ecossistema planejado, em especial, quando há intenção na restauração florestal (Stanturf et al., 2014; Li et al., 2006, Parrotta e Knowles, 2001, Miao e Marrs, 2000, Bradshaw, 2000, 1997, Bradshaw, 1984).

Ainda, quando se busca a restauração de ecossistemas que possuem um elevado nível de complexidade, a tarefa é dificultada, tornando a tomada decisão referente ao cessar de ações árdua (Leinfelder et al., 2015).

Entretanto, o campo de estudo tem evoluído a esse respeito. Considerando-se a restauração ecológica como escopo, a comparação dos ambientes em recuperação com os ecossistemas de referência têm se demonstrado como uma solução viável, pois, apesar de em algumas situações representar algo improvável, fornece critérios para avaliação dos resultados obtidos e diretrizes quanto às limitações técnicas e conceituais existentes que não permitiram uma restauração completa (Rosenfield e Müller, 2017; Lei et al., 2016; Ribeiro et al., 2016).

^a Estudo publicado no periódico Ecological Engineering. 2017, 108(A), 93:99.
DOI 10.1016/j.ecoleng.2017.08.008

Considerando que há uma dificuldade no entendimento em como se avaliar ambientes em recuperação, esse Capítulo apresenta uma proposta metodológica para avaliação e caracterização das áreas em recuperação na Floresta Nacional do Jamari em relação ao ecossistema de referência, por meio na sua resposta fitossociológica.

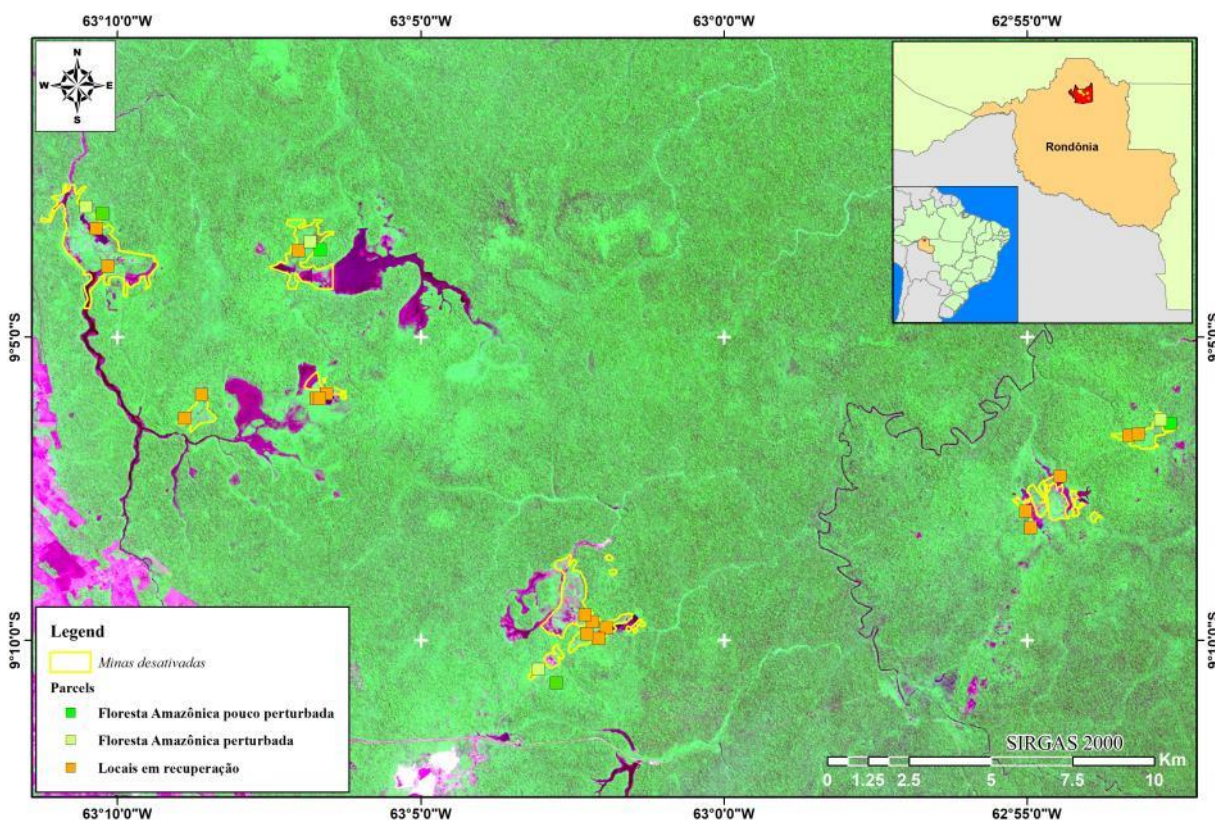
4.2 Metodologia

4.2.1 Delineamento empregado

O estudo foi realizado tomando 7 minas em recuperação (Figura 6), com dados coletados em 17 parcelas de monitoramento (50m x50m), posicionadas no sentido Sul-Norte, a partir das estradas de acesso. A coleta de dados foi realizada em 2010, com as idades de plantio variando entre 3 e 9 anos.

Com objetivo de se avaliar o desempenho fitossociológico dos locais em recuperação, dados das áreas de entorno, coletados em 9 parcelas localizadas em floresta secundária (Capoeira) e floresta primária (Floresta Amazônica levemente perturbada), também foram utilizados.

Figura 6 – Localização das parcelas amostradas para os parâmetros fitossociológicos.



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

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

Os locais apresentavam diferentes características granulométricas do solo, bem como diferentes classificações do solo substrato (Tabela 5). Em sua maioria foram investigadas áreas localizadas sobre rejeito e com granulométrica arenosa.

Tabela 5 – Características gerais dos locais dos locais amostrados.

Locais amostrados	Solo/Substrato	Idade de Plantio (Anos)	Granulometria do solo (%)					Matéria orgânica (g/dm ³)
			Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	
Parcela 1 - Mina 1	Rejeito seco	8	7.9	4.8	58.9	18.2	10.2	16.7
Parcela 2 - Mina 1	Rejeito seco	9	19.6	6	41	14.5	18.9	21.3
Parcela 3 - Mina 1	Rejeito seco	4	14.6	1.6	28.4	32.8	22.6	5.3
Parcela 1 - Mina 2	Rejeito capeado	3	15.6	10.3	28.9	29.8	14.6	23.3
Parcela 2 - Mina 2	Rejeito seco	5	13.1	2.1	31.3	28	25.5	11
Parcela 1 - Mina 3	Rejeito úmido	3	16.1	6	37.1	28.8	12	14.7
Parcela 2 - Mina 3	Rejeito úmido	9	14.9	5.7	43.5	22.6	13.3	12.3
Parcela 1 - Mina 4	Rejeito seco	9	17.5	6.3	45.5	22.6	8.1	19.3
Parcela 1 - Mina 5	Rejeito úmido	7	14.6	6	36.8	25.7	14.2	9
Parcela 2 - Mina 5	Rejeito úmido	6	13.8	5.4	50	16.4	14.6	8.7
Parcela 1 - Mina 6	Piso de lavra	8	34.5	8.4	28.2	17.7	11.2	9
Parcela 2 - Mina 6	Piso de lavra	7	37.2	29.6	16.6	7.4	9.2	13.3
Parcela 3 - Mina 6	Rejeito seco	8	25.1	9.5	43.4	19.4	2.6	10
Parcela 4 - Mina 6	Rejeito seco	7	10.1	3.8	40	30	16.1	5.7
Parcela 5 - Mina 6	Rejeito capeado	7	17.3	2.3	22.9	30.3	27.2	9.3
Parcela 6 - Mina 6	Piso de lavra	8	9.3	6.5	67	15.4	1.8	10.3
Parcela 1 - Mina 7	Rejeito capeado	7	29.6	27.5	29.3	10.8	2.8	12.3
Parcela 2 - Mina 7	Rejeito seco	5	27.4	7.7	23	21.3	20.6	9.7
Parcela 3 - Mina 7	Rejeito capeado	5	16.8	7.2	24.8	27.5	23.7	12

Foram investigadas quatro variáveis fitossociológicas, a altura média de indivíduos arbóreos, com Diâmetro de Altura do Peito (DAP) superior a 10cm, área basal (Equação 1), riqueza média de espécies por parcela e número de indivíduos regenerantes naturais por parcela.

Para determinação da riqueza média de espécies, foram computados os valores do número total de espécies amostradas nas parcelas de 50mx50m. Para os indivíduos regenerantes, foram contabilizados em sub-parcelas de 10mx10m, posicionadas no interior das parcelas de 50mx50m, o número de indivíduos, com DAP superior a 3cm, provenientes da regeneração natural, pelo processo de propagação natural da vegetação. As mesmas variáveis foram avaliadas nas áreas de entorno, de floresta secundária e primária.

Para fins de comparação entre os locais em recuperação e os ambientes naturais foram extrapolados os valores de indivíduos regenerantes para indivíduos/m².

$$AB = \frac{2\pi \times DAP}{4} \quad (1)$$

Onde, AB é a área basal, DAP é o diâmetro da altura do peito. Para indivíduos com tronco bifurcado a área basal foi determinada através da soma das áreas dos troncos.

4.2.2 Estrutura florística

No total os locais apresentaram 91 espécies plantadas, pertencendo a 37 famílias, além de 22 espécies exclusivas do processo de regeneração natural (29% do total amostrado).

As famílias botânicas com maior número de indivíduos foram a Fabaceae, Myrtaceae and 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, nas 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.

4.2.3 Análise Cluster

Para agrupamento dos locais em recuperação, com base em suas características fitossociológicas, se empregou o método de agrupamento hierárquico.

Esse método não requer nenhum conhecimento *a priori*, sobre o número de grupos esperados, além de materializar, graficamente, as diferenças existentes entre os objetos em estudo em grupos formados através do Dendograma (Legendre e Legendre, 2012; Romesburg, 2004; Jongman et al., 1995).

Como o conjunto de dados se apresentou completo (sem dados ausentes - *missing values*) se empregou a Distância Euclidiana na determinação do grau de diferença entre os locais amostrados e o método de Mínima Variância de Ward no algoritmo de agrupamento.

Como as variáveis apresentavam diferentes grandezas, foi realizado o processo de padronização em uma etapa preliminar ao processo de agrupamento. Para isso foi adotado o método Z-scores (Equação 2) com objetivo de se obter uma contribuição igualitária de cada variável na definição dos grupos.

$$Z_{ij} = \frac{(X_{ij} - Xm_j)}{S_i} \quad (2)$$

Onde, X_{ij} é o valor original do dado, Xm_j é a média da variável j^{th} e S_i o desvio padrão da variável i^{th} .

Após a definição do Dendograma o Coeficiente de Correlação Cofenético foi calculado para determinar o grau de distorção do dendograma, causado pelo processo de agrupamento.

O pacote Pvcust (Suzuki & Shimodaira, 2015) do programa estatístico R (R Core Team, 2017) foi utilizado para determinação da confiabilidade dos grupos formados. A estimativa não enviesada (AU *p-values*) foi utilizada para determinar o grau de confiabilidade do grupo formado e dar suporte a definição dos grupos de recuperação existentes, bem como na sua diferenciação (Suzuki & Shimodaira, 2006).

Para estabelecer o número de grupos existentes entre as áreas em recuperação, foi utilizado o critério proposto por (Romesburg, 2004), com estabelecimento da linha de corte no Dendograma, no maior intervalo de distância Euclidiana que distinguísse os grupos formados. Esse processo tende a selecionar grupos estáveis no processo de distinção, pois a linha de corte é estabelecida na faixa de valores de distância Euclidiana onde ocorrem as maiores diferenças entre esses grupos.

Para validar a seleção dos grupos de áreas em recuperação foi realizada a análise das diferenças fitossociológicas existentes através da ANOVA (não assumindo variâncias homogêneas), com utilização do Teste Tukey na comparação de médias (5% de probabilidade) de todos os grupos formados com mais de três áreas em recuperação.

Ainda, foram avaliados os fatores condicionantes na formação dos grupos estabelecidos pelo estudo de correlação de Pearson, entre as respostas fitossociológicas e características do solo e cada local em recuperação. Todas as análises estatísticas foram realizadas nos programas Assistat® software, versão 7.7 (Silva et al., 2016), e programa R, versão 3.3.2 (R Core Team, 2017).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análise Cluster e Grupos formados

O Dendograma obtido (Figura 7) apresentou um valor de correlação cofenética satisfatório (0,93), sendo superior ao valor (0,8) considerado por Romesburg (2004). O erro-padrão dos valores AU manteve-se abaixo de 0,03, com um tamanho de amostra de *bootstrap* de 10000, conforme o recomendado por Suzuki e Shimodaira (2006) para obtenção de melhores resultados a 95% de confiança.

No Dendograma formado, em 15 clusters, incluindo vários clusters que separam grupos de locais de recuperação (clusters 13,14,15,16,17), foram obtidos valores AU acima de 95%. Isso indica uma elevada estabilidade na formação desses clusters, uma vez que, em 95 de cada 100 vezes, os resultados obtidos pelo

agrupamento com subconjuntos da matriz de dados (*bootstrap resample*) foram os mesmos obtidos utilizando toda a matriz de dados.

Os valores de AU dos clusters 18 e 19 se apresentaram mais baixos, indicando uma maior incerteza na sua formação, sendo este valor inferior a 90% no cluster 19. Esse resultado pode ser explicado pela existência nos cluster 15 ou 17 de algumas áreas com características semelhantes, em sua constituição fitossociológica, causando, no processo de *bootstrap resample*, sua translocação entre o cluster 15 e 17.

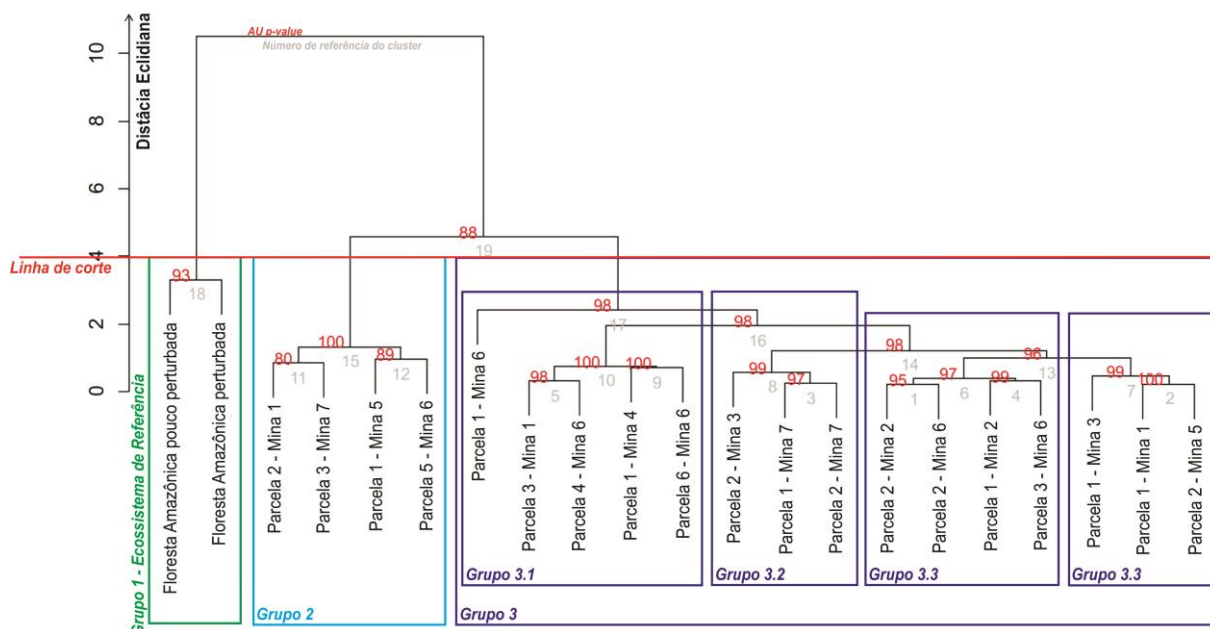
Outro aspecto a ser considerado, principalmente entre os clusters 18 e 19, é a condição da floresta secundária, que apresentou nos parâmetros fitossociológicos uma condição intermediária entre a floresta primária e os locais em recuperação, o que explica, também, a maior incerteza no agrupamento.

Porém, a Figura 7 demonstra uma clara segregação das áreas naturais e os locais de recuperação, agrupados apenas na Distância Euclidiana máxima. Esse resultado demonstra que existem grandes diferenças entre as condições fitossociológicas dos ambientes estudados em relação ao ambiente de referência (Tabela 6).

Em termos de seleção e avaliação de grupos, utilizando-se como critério o maior intervalo de distância Euclidiana, três grupos principais podem ser estabelecidos (Figura 7 - linha de corte). No entanto, esta abordagem agrupa vários clusters com diferentes características fitossociológicas no Grupo 3. Isto ocorreu porque as diferenças entre os locais de recuperação e os sistemas de referência foram muito mais elevadas do que as existentes entre os locais em recuperação, mascarando condições fitossociológicas heterogêneas.

Entretanto, o Grupo 2, por essa abordagem, apresentou uma correta uma distinção, uma vez que apresentou os valores mais próximos de altura média com os sistemas de referência (Tabela 6). O teste de Tukey (Tabela 6) demonstrou que há diferenças significativas entre a altura média e riqueza de espécies entre esses grupos. Ainda, existem diferenças entre as médias do Grupo 3, revelando que, para fins de manejo e gestão, sua subdivisão representa uma melhor opção se considerada a necessidade de avaliação e representação das suas condições fitossociológicas.

Figura 7 – Dendrograma resultante da Análise de Agrupamento, tomando a distância euclidiana e a o método de Ward, para os parâmetros fitossociológicos de minas desativadas em recuperação na Floresta Nacional de Jamari.



Legenda: Os números vermelhos representam clusters com valores p significativos (superior a 95%), números em cinza o passo em cada cluster foi formado e a linha vermelha (linha de corte) os clusters definidos pelo maior intervalo de Distância Euclidiana entre os clusters formados.

Para densidade de indivíduos regenerantes naturais e área basal não foram obtidas diferenças significativas, com obtenção de valores elevados de coeficiente de variação (CV), superiores a 100% para alguns clusters, indicando que o processo de agrupamento teve dificuldade no estabelecimento de grupos homogêneos para esses parâmetros.

Portanto, com base nos resultados obtidos, o estabelecimento dos grupos de recuperação considerado uma abordagem mais seletiva, com a observação das características de cada cluster se mostrou mais adequada. Assim, por esta abordagem, são propostas cinco classes de áreas em recuperação.

A primeira (Cluster 15 – Grupo 2) teve os melhores resultados para a altura média, no entanto, uma baixa riqueza, valores heterogêneos de área basal e baixa densidade de regeneração. A segunda (Cluster 10 – Grupo 3.1) apresentou os melhores valores de altura média, valores intermediários de riqueza de espécies, valores baixos de área basal e uma tendência maior de regeneração natural, apesar da alta variação em seus valores.

A Terceira (Cluster 8 – Grupo 3.2) foi o que apresentou melhores valores de riqueza de espécies e na densidade de regenerantes naturais, embora tenha apresentado valores intermediários de área basal e baixos valores de altura média.

A quarta (Cluster 6 - Grupo 3.3) apresentou os melhores resultados para a área basal, e a segunda melhor riqueza, no entanto, valores baixos de altura média e uma elevada variação nos valores de indivíduos regenerantes. Finalmente, o cluster 7 (Grupo 3.4) foi o que apresentou os piores resultados para todas as variáveis.

Tabela 6 - Resultados do teste Tukey na identificação de diferenças nos grupos formados pelo processo de agrupamento e valores do ecossistema de referência.

Cluster	Parcelas	Altura média (m)**	Riqueza de espécies (Espécies em 500m²)**	Área basal (m²/ha)#	Densidade de regenerantes (Indivíduos/m²)#
15	Parcela 2 - Mina 1	19	4.5	6.22	0.2
	Parcela 3 - Mina 7	20	5	0.89	0.25
	Parcela 1 - Mina 5	15	5	0.43	0.17
	Parcela 5 - Mina 6	14	3.63	6.35	0.24
	Média do cluster	14.5a	4.32c	3.39a	0.21a
	CV (%)	17.32	14.26	93.69	17.19
10	Parcela 1 - Mina 6	9	5	13.25	0.55
	Parcela 3 - Mina 1	9	7	0.96	0.25
	Parcela 4 - Mina 6	10	9	0.55	0.25
	Parcela 1 - Mina 4	12	7	3.33	0.38
	Parcela 6 - Mina 6	10.67	8	1.31	1.99
	Média do cluster	11.34b	7.50b	2.32a	1.19a
8	CV (%)	12.44	20.6	137.78	108.24
	Parcela 2 - Mina 3	5.53	12.5	2.57	0.6
	Parcela 1 - Mina 7	6.75	10	1.84	0.25
	Parcela 2 - Mina 7	8	10	1.3	0.29
	Média do cluster	7.38c	10.00a	1.57a	0.27a
	CV (%)	18.27	13.32	33.49	50.41
6	Parcela 2 - Mina 2	5.5	8	3.68	0.13
	Parcela 2 - Mina 6	6.17	8	4.41	0.51
	Parcela 1 - Mina 2	6.24	5.5	4.05	0.15
	Parcela 3 - Mina 6	7.08	7	3.85	0.69
	Média do cluster	6.66c	6.25bc	3.95a	0.42a
	CV (%)	10.36	16.58	7.85	74.51
7	Parcela 1 - Mina 3	5.83	4	2.44	0.1
	Parcela 1 - Mina 1	4.9	5.5	0.61	0.38
	Parcela 2 - Mina 5	6	6	0.21	0.26
	Média do cluster	5.45c	5.75bc	0.41a	0.32a
	CV (%)	10.62	20.15	109.41	56.95
Ecossistemas de referência	Floresta pouco perturbada	23.08	39.73	27.04	9.61
	Floresta perturbada	14.06	22.49	14.97	10.26

** Significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$). #Dados normais (Shapiro-Wilks $\alpha = 5\%$) através da transformação por função logarítmica.

Porém, houve um local em recuperação que se apresentou favorável à classificação em duas classes. A mina sete apresentou um valor alto para a área basal, muito diferente dos valores obtidos nos outros locais de recuperação e semelhante ao existente nos sistemas naturais. Portanto, o método de Ward a alocou entre os clusters 16 e 15, formando o cluster 17, sendo possível sua

classificação no Grupo 2 ou 3.1. Entretanto, uma vez que os valores das outras variáveis do local apresentaram maior similaridade com as áreas do cluster 10, o local foi agrupado em conjunto com as áreas do Grupo 3.1.

4.3.1 Desempenho fitossociológico e fatores condicionantes

As áreas em recuperação apresentaram valores mais próximos em relação aos sistemas de referência para o parâmetro altura média, sendo, para o local em recuperação com maior valor (Parcela 3 da Mina 7), apenas 3% inferior ao existente na floresta primária. Ainda, a média do cluster que o contém (Cluster 15 - Grupo 2) apresentou valor ligeiramente superior ao existente na floresta secundária.

Conforme o esperado, os locais com maior idade de plantio apresentaram valores mais elevados para a altura média, resultando em uma correlação positiva (Tabela 7).

Entretanto, para a riqueza de espécies o comportamento foi oposto. As áreas com idade de plantio mais elevadas tenderam a apresentar valores inferiores, resultando em uma correlação negativa.

Para esse parâmetro a parcela 2 da Mina 3 apresentou valor mais elevado, todavia, esse valor se apresenta 45% inferior ao existente na floresta secundária e 68% inferior quando comparado à floresta primária. Os valores mais baixos foram identificados nas áreas que compõem o cluster 10, sendo, em geral, 50% inferiores à riqueza do local 2 da Mina 3.

Os indivíduos regenerantes apresentaram uma correlação positiva com a riqueza de espécies, o que indica que o aumento da riqueza está ocorrendo pela propagação das espécies através da regeneração natural, confirmando os resultados obtidos na composição florística.

Além disso, como uma correlação negativa foi obtida entre a riqueza de espécies e a altura média, os resultados sugerem uma diminuição da riqueza ao longo do tempo e a dominância de algumas espécies, que estão se tornando mais altas.

Tal fato pode ser apoiado pelas exigências da Legislação Ambiental Brasileira, que requer o plantio de um determinado número de espécies no início do processo de recuperação, com base na composição do sistema natural. Como o Bioma Amazônico é caracterizado por uma alta densidade florestal, de altura

elevada, as espécies naturais, geralmente, apresentam necessidade de sombreamento para seu desenvolvimento (Knowles e Patrotta, 1995). Assim, a mortalidade de uma porção das espécies plantadas pode ter ocorrido.

Outro aspecto a ser considerado está relacionado às características do substrato do solo. Valores similares para os mesmos parâmetros fitossociológicos foram identificados em locais em recuperação estudados por Parrotta e Knowles (2001), também em Bioma Amazônico, em locais em recuperação minerados com idades de plantio entre 9-13 anos. Esses locais foram classificados pelos Autores como de desempenho precário pelo preparo ineficiente do solo.

Como as áreas estudadas se localizam em solos-substratos de predominância arenosa, em áreas de rejeitos minerários, há uma maior dificuldade no desenvolvimento vegetal adaptado a condição natural, com a predominância e desenvolvimento de espécies adaptadas a nova condição ambiental, o que explicaria os resultados observados.

Ainda, os resultados para a área basal demonstraram que alguns locais com plantios mais jovens, como as parcelas 1 e 2 da Mina 3, apresentaram valores mais elevados para o parâmetro do que em áreas com maior idade de plantio, resultando em uma fraca correlação entre esses parâmetros.

Em geral, os valores de área basal foram mais elevados em locais com maior quantidade de matéria orgânica e material siltoso e argiloso, resultando em correlação positiva, o que sugere a influência das condições do solo nas características fitossociológicas obtidas.

Além disso, a correlação negativa identificada entre o parâmetro e a porcentagem de areia do solo, indica que esta variável fitossociológica pode ter sido influenciada pelos efeitos do material fino nas camadas superficiais do solo, como maior CTC, humidade e capacidade de retenção de água.

A densidade da regeneração natural espontânea, embora tenha apresentado valores muito distantes dos valores existentes nas áreas naturais foram obtidos (80% menor para a parcela 6 da Mina 6 e pelo menos 95% inferior para as demais áreas em recuperação), também mostrou uma tendência similar, com valores mais elevados obtidos em áreas com maior quantidade de material fino nas camadas superficiais.

Tabela 7 - O coeficiente de correlação de Pearson e o valor p para as variáveis fitossociológicas das minas desativadas em recuperação.

Coeficiente de correlação de Spearman	Altura média (m)	Riqueza de espécies (Espécies em 500m²)	Área basal (m²/ha)	Densidade de regenerantes (Indivíduos/m²)	Idade de plantio (anos)	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Matéria orgânica (g/dm³)
Altura média (m)	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riqueza de espécies (Espécies em 500m²)	-0.35	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Área basal (m²/ha)	-0.04	-0.12	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Densidade de regenerantes (Indivíduos/m²)	-0.06	0.44	0.08	1	-	-	-	-	-	-	-
Idade de plantio (anos)	0.79	-0.3	0.23	-0.04	1	-	-	-	-	-	-
Argila (%)	0.23	-0.1	0.59	0.05	0.06	1	-	-	-	-	-
Silte (%)	0.07	0.07	0.41	0.25	-0.07	0.69	1	-	-	-	-
Areia fina (%)	-0.05	0.01	-0.19	0.19	0.04	-0.49	-0.15	1	-	-	-
Areia média (%)	-0.05	-0.08	-0.46	-0.32	-0.06	-0.59	-0.76	-0.09	1	-	-
Areia grossa (%)	0.06	-0.12	-0.24	-0.35	0.06	-0.25	-0.73	-0.46	0.63	1	-
Matéria orgânica (g/dm³)	-0.21	-0.11	0.47	-0.12	-0.12	0.14	0.37	0.22	-0.43	-0.35	1
Valor p	Altura média (m)	Riqueza de espécies (Espécies em 500m²)	Área basal (m²/ha)	Densidade de regenerantes (Indivíduos/m²)	Idade de plantio (anos)	Argila (%)	Silte (%)	Areia fina (%)	Areia média (%)	Areia grossa (%)	Matéria orgânica (g/dm³)
Altura média (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Riqueza de espécies (Espécies em 500m²)	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Área basal (m²/ha)	0.88	0.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Densidade de regenerantes (Indivíduos/m²)	0.80	0.06	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-
Idade de plantio (anos)	0.01*	0.21	0.35	0.88	-	-	-	-	-	-	-
Argila (%)	0.35	0.67	0.01*	0.85	0.82	-	-	-	-	-	-
Silte (%)	0.78	0.76	0.08	0.30	0.77	0.01*	-	-	-	-	-
Areia fina (%)	0.84	0.95	0.45	0.44	0.87	0.03*	0.53	-	-	-	-
Areia média (%)	0.85	0.74	0.05*	0.18	0.80	0.01*	0.01*	0.72	-	-	-
Areia grossa (%)	0.80	0.63	0.32	0.14	0.81	0.30	0.01*	0.05*	0.01*	-	-
Matéria orgânica (g/dm³)	0.40	0.66	0.04*	0.63	0.62	0.58	0.12	0.38	0.07	0.15	-

* Significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$)

Tais resultados são concordantes com os observados em Ribeiro et al. (2016), onde, em áreas mineradas na Floresta Nacional do Jamari, os locais com melhores condições fitossociológicas, tenderam a apresentar solos com maior teor de argila.

Os resultados obtidos também sugerem que o grau de alteração do solo se revelou como um fator condicionante. Em geral, as áreas localizadas em substrato piso de lavra, substrato com menor grau de alteração, tenderam a apresentar resultados mais próximos às áreas naturais, promovendo o aumento dos valores dos coeficientes de variação dos clusters.

Ainda, os resultados sugerem que além dos fatores citados, há influência de outros fenômenos sobre a densidade de regenerantes naturais, que apresentou nesse estudo apenas relacionamento com a textura do solo. Diversos autores sugerem que o parâmetro apresenta um comportamento não linear no tempo (Huang et al., 2016, Rocha et al., 2016), além da influência da distância em relação à borda da floresta primária e qualidade da serapilheira (Lisboa et al., 2012, Parrotta e Knowles, 2001, Bradshaw, 1997).

4.4 Conclusões

A metodologia proposta permitiu identificar características chave para melhoria dos resultados da restauração florestal, contribuindo para a compreensão das limitações envolvidas na recuperação de áreas degradadas pela mineração na região amazônica.

Apesar da identificação da influência de diferentes fatores condicionantes nos parâmetros fitossociológicos, os resultados demonstraram que o processo de agrupamento possibilitou a classificação dos locais em recuperação conforme suas características.

Portanto, o estudo foi bem-sucedido em estabelecer uma proposta metodológica para comparação dos resultados de estratégias de recuperação em áreas mineradas sob diferentes condições ambientais.

Cada grupo identificado apresentou características e especificidades que podem fornecer um ponto de partida para o estabelecimento de ações voltadas para obtenção de melhores resultados no processo de recuperação. Entretanto, em alguns casos específicos, como para as áreas localizadas em Piso de Lavra, que apresentaram valores excepcionais em relação a todas as outras áreas em recuperação, a altura média e a riqueza de espécies foram decisivas no processo de agrupamento. Portanto, a utilização de variáveis sintéticas, derivadas da análise fatorial, pode representar um avanço no desenvolvimento da proposta metodológica aqui apresentada.

As variáveis fitossociológicas demonstraram que há influência do nível de alteração do solo e características granulométricas nos resultados obtidos após plantio, fornecendo embasamento para investigação das propriedades físicas, químicas e microbiológicas desses locais.

5 INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO PARA ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

5.1 Introdução

Embora os processos de revegetação representem um componente fundamental no processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração, há uma grande influência das características do solo, bem como seu grau de alteração nos resultados obtidos (Mukhopadhyay et al., 2014).

Estudos apontam que a médio e longo prazo as ações de preparo do solo, realizadas nas etapas preliminares do processo de recuperação, influenciaram de forma limitante, ou positiva, as características dos ambientes formados (Lei et al., 2016; Ribeiro et al., 2016; Mukhopadhyay et al. 2016; Parrotta e Knowles, 2001).

Nesse viés, há uma íntima relação entre as características físicas, químicas e microbiológicas com o desenvolvimento do ecossistema resultante, sendo o restabelecimento das propriedades do solo um fator condicionante para o retorno da resiliência desses locais (Schoenholtz, 2000; Bradshaw, 2000). Porém, ainda que seja necessário o conhecimento das suas propriedades do solo, sua anisotropia, carência de estudos de caso e multidimensionalidade dificultam a construção do conhecimento nesse campo.

Como agravante os solos tropicais são predominantemente caracterizados por baixa fertilidade natural e alta acidez, com deficiências em P, N, K, S, Ca, Mg, B, Cu, Zn e ocasionalmente micronutrientes (Costa et al., 2006; Moreira e Malavolta, 2004). Como as condições climáticas de alta temperatura e alta precipitação prevalecem, há uma intensa intemperização dos minerais do solo, resultando em baixos conteúdos de cátions e bases trocáveis, além de uma elevada acidez potencial e disponibilidade de Al^{3+} trocável no solo (Delarmelinda et al., 2017).

Nesse contexto, embora o conhecimento das operações com base em princípios silviculturais e ecológicos tenha sido desenvolvidos para reconstrução de florestas degradadas pela mineração, com exemplos na literatura internacional (Stanturf et al., 2014, Bradshaw, 2000, 1997, 1984) e para terras Amazônicas (Ribeiro et al., 2015, Longo et al, 2011; Longo et al, 2011a, Ribeiro et al, 2006, Longo et al., 2005, Ribeiro et al, 2004, Knowles e Parrotta, 2001, 1995), ainda há necessidade de novas investigações relacionadas a influência das propriedades de

substratos minerados e sua influência nos resultados do processo de recuperação, especialmente quando a restauração florestal é adotada em locais que apresentaram elevado grau de alteração das condições naturais.

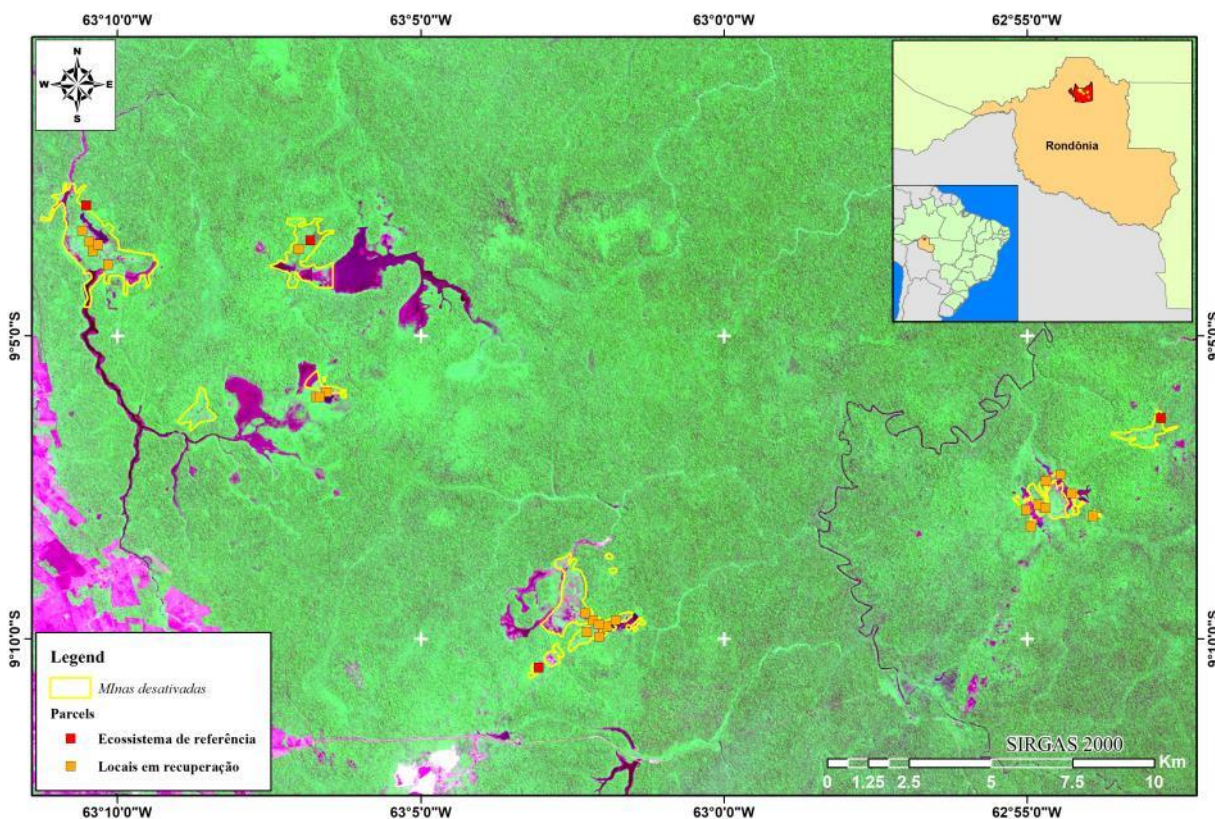
Diante desse contexto esse Capítulo investiga o comportamento de variáveis físicas, químicas e microbiológicas do solo em diferentes condições de substratos minerados submetidos ao processo de recuperação de áreas degradadas na Floresta Nacional do Jamari. As variáveis em estudo foram avaliadas de maneira a consolidar indicadores de recuperação de solos degradados, a partir do seu inter-relacionamento, variabilidade e redundância.

5.2 Metodologia

5.2.1 Delineamento empregado

O estudo foi realizado tomando 24 locais em recuperação, com dados coletados em 24 parcelas de monitoramento (50m x50m), posicionadas no sentido Sul-Norte, a partir das estradas de acesso. Foram utilizados dados coletados entre 2011 e 2014, sendo que as áreas em recuperação investigadas apresentavam diferentes idades de plantio, variando entre 9 e 23 anos (Figura 8).

Figura 8 – Localização das parcelas amostradas para os parâmetros químicos e microbiológicos.



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

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

5.2.2 Coleta e análises de solo

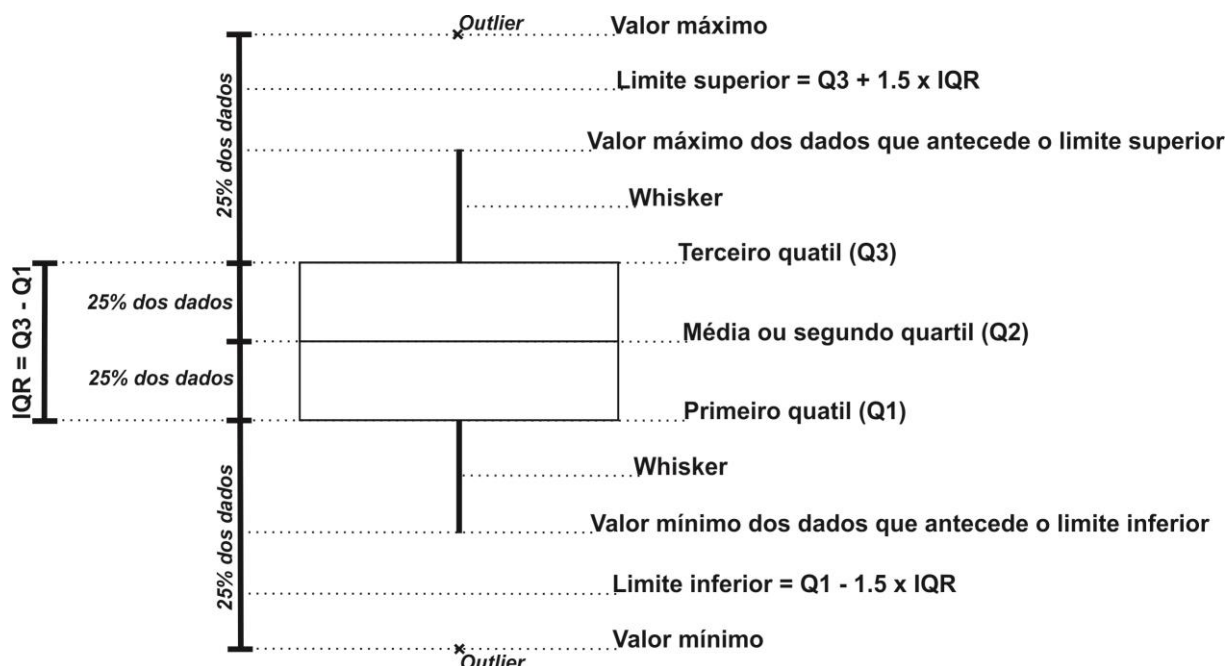
As coletas de solo foram realizadas em 2011, 2012, 2013 e 2014, seguindo o procedimento de amostragem composta aleatória em três sub parcelas de 10mx10m. Em cada sub parcela foram realizadas cinco sub amostras de aproximadamente 0.5kg, na profundidade de 0-0.2m. Posteriormente, as amostras foram homogeneizadas, resultando em três amostras compostas por parcela em recuperação. O mesmo procedimento foi adotado em duas áreas localizadas em áreas naturais, adjacentes às parcelas em recuperação, em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico bem drenado franco pedregoso e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico bem drenado argiloso muito pedregoso.

As amostras destinadas a investigação das características químicas e físicas do solo foram secas ao ar (30-35°C) e as amostras destinadas a investigação dos parâmetros bioquímicos do solo foram mantidas em refrigeração (4°C) até análise laboratorial. Todas as análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Biogeoquímica pertence ao Departamento de Tecnologia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada em Jaboticabal, Estado de São Paulo, através dos procedimentos padrões da Tabela 4.

5.2.3 Análise estatística

Os dados foram subdivididos em quatro tratamentos principais, considerando os substratos minerados e a referência natural (Piso de lavra, Rejeito capeado, Rejeitos Seco e Referência Natural). A variabilidade existente em cada tratamento, para cada variável, e as tendências ao longo do tempo foram avaliadas por meio da análise gráfica Box plot (Tukey, 1977). Construiu-se para cada variável e ano amostrado quatro Box plots (um para cada tratamento) a partir de medidas de quartil e Whiskers (Figura 9).

Figura 9 – Principais componentes de um box plot: media, quartis, whiskers, limites e outliers.



A análise de correlação de Spearman foi realizada, tomando os dados dos solos minerados para verificação do seu inter-relacionamento, e posteriormente à análise de componentes principais (ACP) foi empregada para a identificação da contribuição dos parâmetros do solo na variabilidade total amostral (Legendre e Legendre, 2012). Valores médios foram utilizados de maneira a suprimir o efeito de outliers e valores espúrios. Devido às diferenças na grandeza dimensional entre as variáveis estudadas, foi necessário padronizar os valores médios em etapa preliminar a ACP, através da função de padronização z-scores (Equação I).

O teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) foi utilizado para verificar adequabilidade da malha amostral a ACP (Hair et al., 1987; Kaiser, 1974) e somente as principais componentes (CPs) com autovalores ≥ 1 , explicando pelo menos 5% da variação total (Mukhopadhyay et al., 2014), foram examinadas. A rotação OBLIMIN foi empregada para redistribuir a variância nas CPs e as cargas fatoriais que alcançaram pelo menos $\pm 0,30$ foram avaliadas (Hair Jr. et al., 2010).

As análises estatísticas foram implementadas no programa R (R Core Team 2017) utilizando os pacotes: ggplot2 (Wickham, 2009), Hmisc (Harrell Jr. and Dupont, 2016), FactoMineR (Le et al., 2008), factoextra (Kassambara and Mundt, 2017); e as rotinas STHDA (2017, 2017a and 2017b).

5.3 Resultados

5.3.1 *Análise box plot*

A capacidade de retenção de água (CRA) dos solos minerados apresentou elevada variação, entre 20 e 74% (Tabela 8), com as parcelas localizadas sob o substrato Piso de Lavra assumindo valores mais elevados (35 a 74%) e mais próximos a referência natural, que apresentou valores entre 36 e 90% (Tabela 9).

Os box plots (Figura 10B) demonstraram que as áreas localizadas no substrato Piso de Lavra com valores superiores ao terceiro quartil (Q3), atingiram uma condição próxima ao primeiro quartil (Q1) da floresta natural. Ainda, apenas as parcelas que apresentaram valores abaixo do Q1 se assemelharam aos valores obtidos para os outros rejeitos, que, apesar da composição granulométrica superficial diferenciada, apresentaram valores próximos entre si.

Para umidade uma tendência similar foi observada (Figura 10A), apesar dos valores ligeiramente superiores para o coeficiente de variação.

A matéria orgânica do solo (SOM) também apresentou valores mais elevados no ambiente natural, com teor variando entre 14 a 36 g / dm³. Nos locais minerados os valores variaram entre 5 a 29 g/dm³, com as parcelas em Piso de Lavra apresentando também, valores mais próximos ao ambiente de referência. Porém, apenas as parcelas com valores extremos (superior ao Upper Whisker), obtiveram resultados semelhantes aos valores mais baixos obtidos (inferior ao Lower Whisker) para na condição natural (Figura 10A).

Ainda, essa variável apresentou uma variação não esperada, com tendência de aumento de 2011 a 2013 e diminuição em 2014. Esses resultados poderiam indicar uma variação natural da matéria orgânica nos solos minerados, e na floresta natural. Entretanto, observou-se no período de coleta das amostras, de fevereiro a abril, em 2014, a ocorrência de condição climática imprevisível que pode ter afetado os resultados. As precipitações no primeiro semestre desse ano foram consideravelmente mais baixas, com um déficit de 425, 241, 459 mm em relação a 2011, 2012 e 2013, respectivamente.

Com menor nebulosidade e maior incidência solar as temperaturas máximas também se apresentaram mais elevadas, entre 1 a 2 °C (BDMEP / INMET, 2017).

Essa condição climática não se pronunciou na umidade do solo, porém, observou-se seu efeito na CRA e em outras variáveis relacionadas a microbiota do solo.

O Carbono orgânico do solo (COS) aparentemente se mostrou sensível a essa alteração pluviométrica, com grande redução nos valores obtidos em 2014. Na floresta natural esse parâmetro constituiu de 10 a 20% da matéria orgânica, enquanto nas áreas mineradas apenas de 1,5 a 13%. Os solos minerados apresentaram valores próximos ao longo dos anos, com ligeiramente diferenças entre os tratamentos.

Entretanto, em 2014, apresentaram uma significativa redução, com valores do Q3 próximos ao Q1 de 2013 (Figura 10F). A floresta natural, apesar da elevada variabilidade manteve valores próximos à tendência histórica, com ligeira tendência de aumento em 2014.

A fração viva da matéria orgânica, o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), também se mostrou sensível a essa condição. Uma tendência de aumento foi observada, apesar da elevada variabilidade (Figura 10C). Valores mais elevados foram obtidos para a floresta natural, com apenas as áreas em Piso de lavra atingindo resultados similares.

Outro parâmetro que apresentou sensibilidade foi a Respiração Basal do Solo (SBR), com uma tendência crescente, atingindo valores significativamente mais elevados em 2014 (Figura 10H). No entanto, esse efeito só foi observado para os solos minerados, enquanto que a floresta natural manteve-se com valores estáveis, de 1 e 2,6 mg de CO₂/h.

O quociente metabólico microbiano (qCO₂) revelou valores estáveis e baixos na floresta natural, enquanto que os solos minerados apresentaram variações de maior magnitude, com aumento significativo em 2014 (Figura 10G). Dentre os parâmetros avaliados, a atividade enzimática apresentou a maior variação entre tratamentos, com uma tendência de aumento ao longo do tempo nos solos minerados, alcançando valores próximos à referência natural (Figura 10 D e E).

Figura 10 – Box plots obtidos a partir das variáveis físicas e bioquímicas, considerando a regra de intervalo 1,5 interquartil.

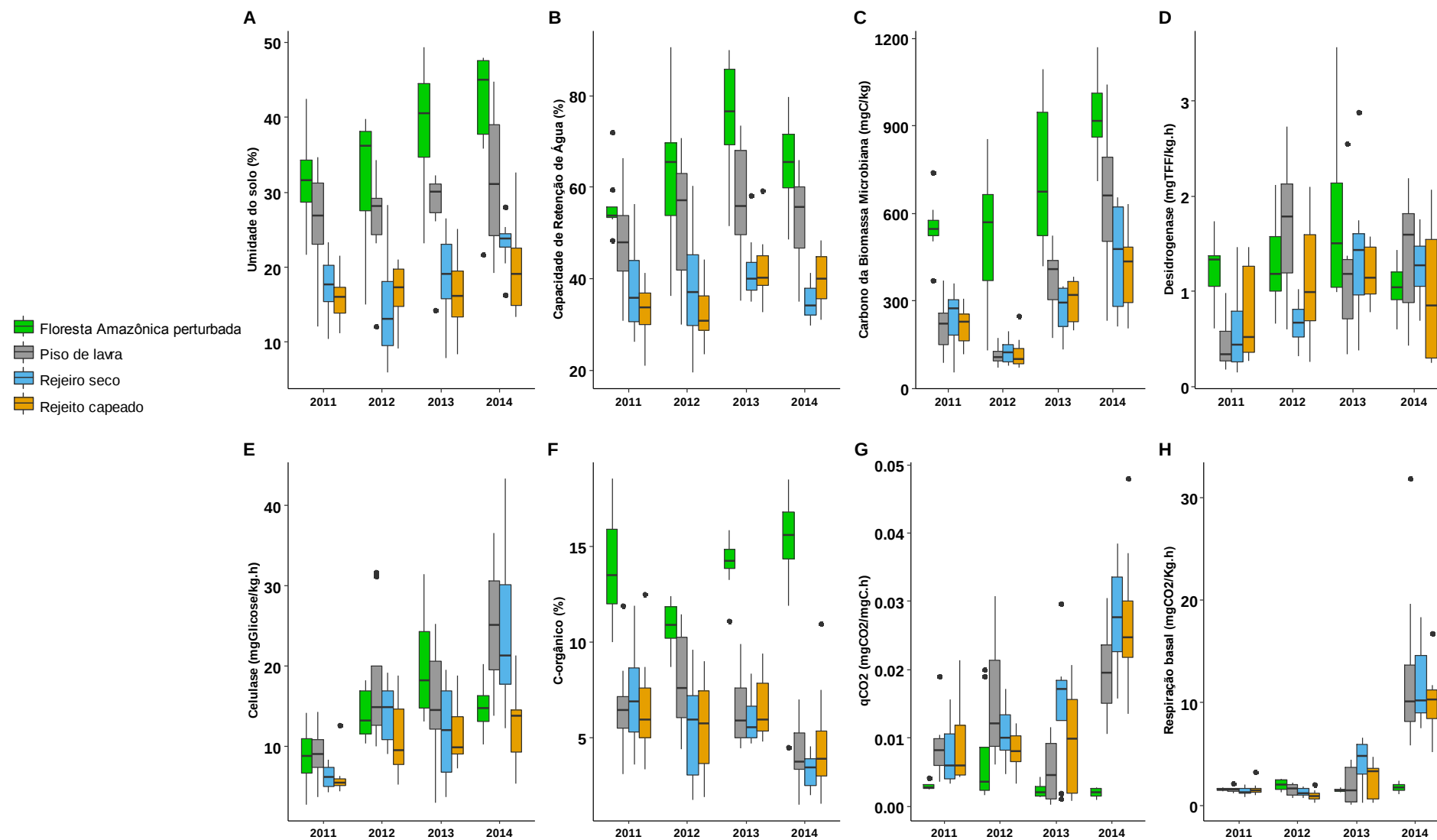


Figura 11 – Box plots obtidos a partir das variáveis de fertilidade do solo, considerando a regra de intervalo 1,5 interquartil.

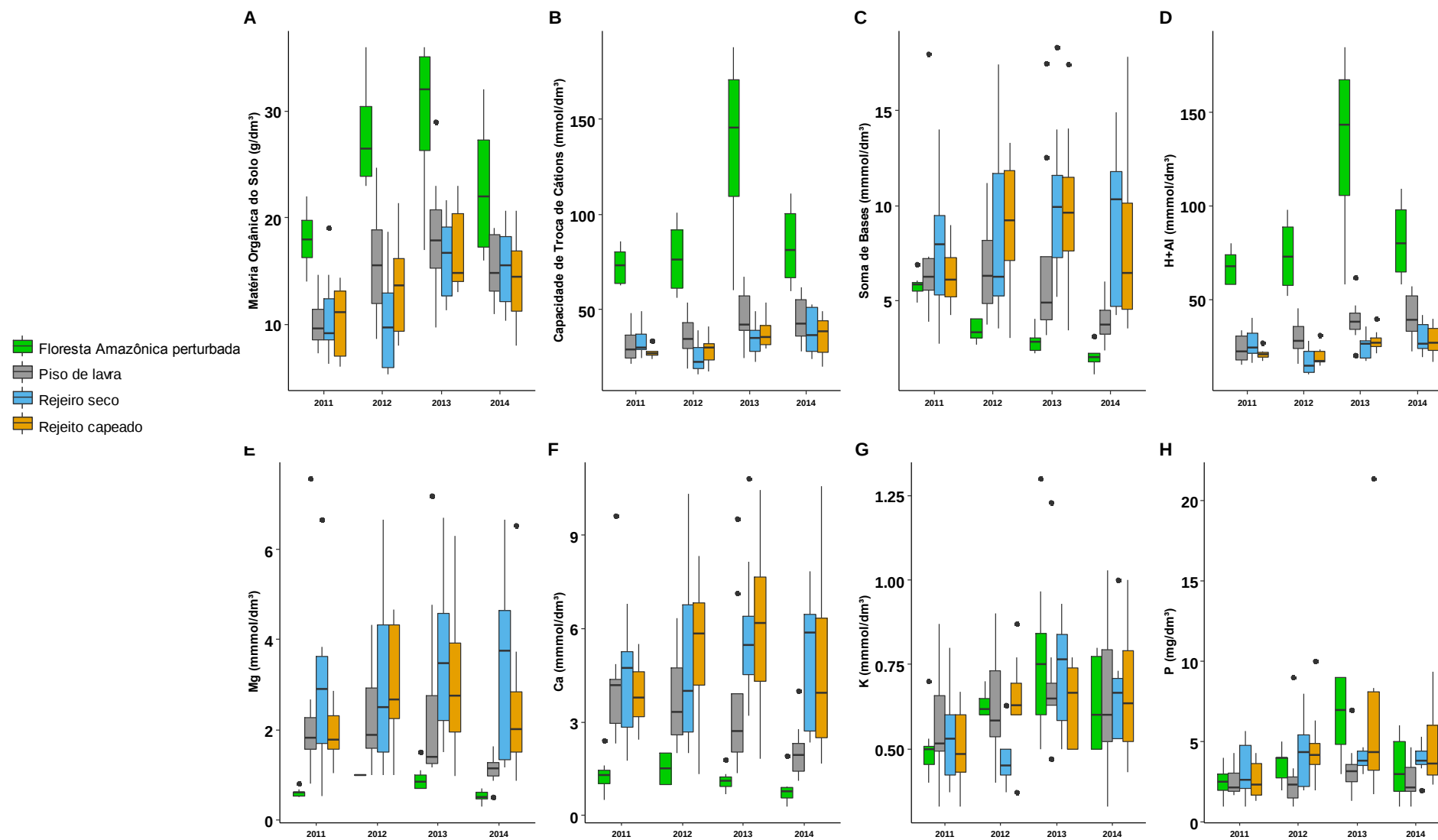


Tabela 8 – Sumário estatístico dos dados dos solos minerados.

Ano de amostragem	Parâmetro estatístico	US	CRA	RBS	CBM	qCO ₂	AD	AC	C-org	P	MOS	CTC	SB	V%	H ⁺ e Al ³⁺	Mg	Ca	K	pH
2011	Mínimo	10.43	20.92	0.86	55.14	0.0033	0.15	3.68	3.09	1	6	21.37	2.7	7.93	15	0.53	1.77	0.33	4.1
	Q1	14.35	32.08	1.26	149.48	0.0046	0.28	5	4.88	1.67	8.33	25.26	4.82	18.21	18.33	1.5	2.8	0.43	4.3
	Mediana	17.8	37.16	1.48	236.32	0.0066	0.4	6.12	6.45	2.33	9.83	28.62	6.4	23.13	22	1.83	4.17	0.52	4.43
	Média	19.86±6.77	39.37±1.43	1.54±0.48	223.27±	0.0084±	0.61±	7.18±	6.8±	2.78±	10.56±	30.83±	7.2±	23.55±	23.62±	2.45±	4.22±	0.54±	4.47±
	CV	34.08	29.04	31.11	37.37	58.85	72.11	39.92	39	46.9	31.9	25.12	46.89	35.17	27.86	68.52	41.21	26.93	5.45
	Q3	23.83	46.82	1.68	291.99	0.0111	0.95	8.41	8.45	3.67	13.92	33.88	8.86	29.8	29.25	2.87	4.87	0.6	4.6
	Máximo	34.72	66.34	3.22	368.59	0.0214	1.47	14.38	12.47	5.67	19	49.27	18	37.93	40.33	7.57	9.6	0.87	5.07
2012	Mínimo	5.97	19.49	0.29	70.45	0.0034	0.26	5.31	1.74	1	5.33	16.07	3	9.76	10	1	1.33	0.37	3.87
	Q1	12.22	29.82	0.84	80.4	0.0075	0.6	9.47	4.17	2	8.67	21	4.93	18.56	15.33	1.67	2.67	0.43	4.13
	Mediana	18.92	38.92	1.08	113.34	0.0095	1.01	13.51	6.44	3.67	12.17	29.6	7.6	26.3	20.84	2.5	4.33	0.59	4.24
	Média	19.3±8.02	41.25±1.44	1.26±0.54	120.53±45.99	0.0114±0.064	1.18±0.72	14.52±6.58	6.31±2.83	3.95±2.44	13.25±5.32	30.22±1.028	8.05±3.77	27.48±1.172	22.17±9.41	2.8±1.54	4.68±2.34	0.58±0.16	4.4±0.48
	CV	41.55	34.97	42.7	38.16	56.29	60.59	45.3	44.89	61.75	40.14	34.03	46.87	42.66	42.44	55.11	50.1	27.04	10.87
	Q3	27.35	51.56	1.76	156.8	0.0131	1.83	18.15	8.62	5.17	17.67	38.55	11.27	32.63	27.42	4.25	6.67	0.66	4.52
	Máximo	34.35	70.64	2.18	249.27	0.0308	2.73	31.74	11.42	10	24.67	53.83	17.43	63.54	45.33	6.67	10.33	0.9	5.87
2013	Mínimo	7.9	32.71	0.11	134.01	0.0003	0.34	3.01	4.44	1.33	9.67	22.53	3.17	7.18	17.33	0.97	1.37	0.47	3.83
	Q1	14.49	37.63	0.5	230.89	0.0014	0.85	8.33	5.02	3	13.25	31.47	5.21	14.53	24.25	1.4	2.81	0.55	4.06
	Mediana	20.05	43.11	3.47	332.43	0.0099	1.27	13	5.81	3.67	16	37.3	8.55	24.76	28	2.34	5.17	0.67	4.2
	Média	20.86±7.73	47.23±1.8	2.87±2.19	315.42±10.092	0.01±0.0083	1.26±0.59	12.93±5.84	6.35±1.63	4.66±3.96	17.18±4.65	39.6±11.36	9.02±4.71	22.99±9.91	30.58±1.026	3.12±1.95	5.21±2.83	0.69±0.17	4.19±0.18
	CV	37.05	24.98	76.36	32	82.98	46.82	45.15	25.7	85.11	27.09	28.69	52.25	43.12	33.54	62.42	54.28	24.83	4.33
	Q3	27.39	56.9	4.35	381.83	0.0172	1.56	17.78	7.52	4.67	21	45.82	12.1	28.87	36.58	4.69	7.51	0.77	4.3
	Máximo	32.28	73.52	6.62	525.36	0.0297	2.88	25.28	9.88	21.33	29	67.07	18.37	42.07	61.67	7.2	10.8	1.23	4.53
2014	Mínimo	13.39	29.63	5.24	206.9	0.0106	0.25	5.46	1.5	1	8	20.17	2.37	4.73	16.67	0.5	1.13	0.33	3.53
	Q1	19.29	34.59	8.12	292.03	0.0175	0.6	13.99	2.64	2.33	11.84	28.66	3.85	9.43	24.08	1.18	2.14	0.53	3.7
	Mediana	23.78	39.51	10.21	492.82	0.0236	1.28	19.27	3.65	3.5	14.84	37.32	4.75	18.09	33	1.49	2.74	0.63	3.85
	Média	24.88±8.53	42.67±1.08	11.62±5.7	504.1±221.23	0.0248±0.0091	1.2±0.6	20.58±9.7	4.09±2.14	3.76±2	15.04±3.6	39.88±1.84	7.03±4.33	17.98±9.02	32.85±1.26	2.4±1.86	3.97±2.51	0.67±0.19	3.86±0.19
	CV	34.28	25.3	49.1	43.89	36.68	49.56	47.15	52.45	53.22	23.96	29.69	61.6	50.14	34.28	77.57	63.28	28.81	4.81
	Q3	28.02	48.74	13.83	630.87	0.0314	1.74	28.81	4.59	4.59	18.59	50.85	10.52	25.37	39.42	3.67	6.12	0.76	4
	Máximo	44.81	65.98	31.8	1041.82	0.0479	2.19	43.32	10.95	9.33	20.67	61.77	17.83	39.19	57	6.67	10.57	1.03	4.27

Onde, US representa a umidade do solo, CRA a capacidade de retenção de água, RBS a respiração basal do solo, qCO₂ o coeficiente metabólico, AD a atividade desidrogenase, AC a atividade celulase, C-org o carbono orgânico do solo, P o fósforo disponível, MOS a matéria orgânica do solo, CTC a capacidade de troca de cátions, SB a soma de bases, V% a saturação por bases, H⁺ e Al³⁺ a acidez potencial do solo, Mg o magnésio disponível, Ca o cálcio disponível, K o potássio disponível.

Tabela 9 – Sumário estatístico dos dados dos solos do ambiente de referência em floresta Amazônica perturbada.

Ano de amostragem	Parâmetro estatístico	US	CRA	RBS	CBM	qCO ₂	AD	AC	C-org	P	MOS	CTC	SB	V%	H ⁺ e Al ³⁺	Mg	Ca	K	pH
2011	Mínimo	21.6	48.42	1.4	371.14	0.0024	0.61	2.83	9.98	1	14	62.9	4.9	6.21	58	0.5	0.5	0.4	3.8
	Q1	27.06	53.09	1.48	511.63	0.0025	0.96	6.36	11.96	2	15.42	63.83	5.36	7.1	58	0.51	1.01	0.42	3.8
	Mediana	31.57	53.79	1.56	546.65	0.0027	1.34	8.89	13.49	2.5	18	73.45	5.85	7.87	67.67	0.6	1.3	0.5	3.87
	Média	31.57±6.3	56.03±7.07	1.57±0.12	552.15±10.306	0.0029±0.006	1.23±0.35	8.8±3.62	13.91±2.76	2.5±0.89	18±2.82	73.45±9.52	5.78±0.59	7.96±1.06	67.67±9.37	0.6±0.1	1.32±0.55	0.5±0.09	3.87±0.07
	CV	19.97	12.62	7.82	18.67	20.2	28.2	41.1	19.81	35.64	15.65	12.96	10.15	13.27	13.84	16.64	41.72	18.79	1.85
	Q3	35.3	58.24	1.65	600.98	0.0032	1.4	11.56	15.98	3	20.58	83.7	6	9	78	0.65	1.55	0.52	3.9
	Máximo	42.41	71.88	1.79	738.89	0.0042	1.74	14.15	18.52	4	22	85.9	6.9	9.23	80	0.8	2.4	0.7	4
2012	Mínimo	15.01	36.18	1.25	130.67	0.0016	0.66	10.35	8.67	2	23	56	2.63	2.8	52	1	1	0.6	3.7
	Q1	24.1	53.23	1.47	215.32	0.0021	1	11.5	9.6	2.25	23.75	60.22	3	3.05	56.5	1	1	0.6	3.71
	Mediana	36.22	65.58	2.06	569.92	0.0035	1.19	13.26	10.9	4	26.5	76.5	3.32	4.69	73	1	1.5	0.62	3.8
	Média	31.94±9	63.04±16	2.02±0.56	513.74±26.532	0.0071±0.0077	1.33±0.52	14.04±3	10.81±1.32	3.5±1.07	27.67±4.74	77.08±18	3.41±0.56	4.81±1.87	73.67±19.23	1±0	1.5±0.53	0.63±0.04	3.82±0.11
	CV	28.17	25.39	27.58	51.64	107.32	39.27	21.33	12.2	30.54	17.14	24.27	16.45	38.85	26.1	0	35.63	6.89	2.84
	Q3	38.65	69.75	2.58	733.09	0.0155	1.92	17.08	11.97	4	31.25	93.23	4	6.45	90.5	1	2	0.68	3.9
	Máximo	39.75	90.65	2.6	853.9	0.0199	2.12	18.27	12.38	5	36	101	4	7.14	98	1	2	0.7	4
2013	Mínimo	23.19	51.46	1.25	418.46	0.0013	0.99	13.15	11.06	3	17	60.4	2.2	1.31	58	0.7	0.7	0.5	3.2
	Q1	32.83	66.5	1.28	522.03	0.0015	1.01	13.77	13.43	4.5	25	102.43	2.33	1.58	99.25	0.7	0.91	0.6	3.2
	Mediana	40.56	76.54	1.43	676.07	0.002	1.5	18.21	14.22	7	32	145.75	2.83	1.85	143.5	0.83	1.1	0.75	3.3
	Média	38.87±8.62	75.28±12.87	1.47±0.19	728.42±24.863	0.0023±0.001	1.77±0.9	19.81±6.49	14.06±1.44	6.67±2.57	29.83±6.82	137±44.9	2.83±0.58	2.33±1.01	134.17±4.93	0.92±0.28	1.13±0.34	0.78±0.26	3.35±0.17
	CV	22.18	17.1	13.1	34.13	44.46	50.98	32.77	10.26	38.54	22.85	32.81	20.42	43.36	33.49	30.11	29.7	32.57	5.05
	Q3	45.37	86.37	1.64	967.88	0.0029	2.38	24.56	15.06	9	35.25	173.6	3.08	3.39	170.75	1.07	1.3	0.93	3.5
	Máximo	49.4	89.92	1.78	1095.08	0.0043	3.57	31.42	15.84	9	36	188	4	3.97	185	1.5	1.8	1.3	3.6
2014	Mínimo	21.6	48.59	1.08	709.48	0.0009	0.6	10.32	4.46	1	16	59.5	1.1	1.5	58	0.3	0.3	0.5	3.8
	Q1	36.44	56.09	1.51	822.74	0.0014	0.78	12.27	12.7	1.75	17.08	66.7	1.58	1.98	64.17	0.42	0.53	0.5	3.82
	Mediana	45.01	65.58	1.73	918.91	0.002	1.04	14.76	15.6	3	22	81.45	1.98	2.13	80	0.5	0.77	0.6	3.93
	Média	41.13±9.11	65.42±10.87	1.76±0.43	934.58±14.867	0.002±0.0007	1.04±0.29	14.86±3.17	14.34±4.42	3.33±1.89	22.67±6.07	83.48±19.31	1.98±0.59	2.47±0.96	81.5±19.2	0.52±0.14	0.83±0.48	0.63±0.15	3.92±0.09
	CV	22.16	16.61	24.43	15.91	33.7	27.7	21.36	30.8	56.57	26.8	23.14	29.54	38.78	23.58	26.71	57.61	23.03	2.23
	Q3	47.72	76.45	2.05	1061.37	0.0026	1.32	17.03	16.79	5	27.75	100.35	2.2	2.77	98.25	0.67	0.92	0.79	4
	Máximo	47.93	79.69	2.44	1171.07	0.0027	1.44	20.28	18.48	6	32	111.2	3.1	4.62	109	0.7	1.9	0.8	4

Onde, US representa a umidade do solo, CRA a capacidade de retenção de água, RBS a respiração basal do solo, qCO₂ o coeficiente metabólico, AD a atividade desidrogenase, AC a atividade celulase, C-org o carbono orgânico do solo, P o fósforo disponível, MOS a matéria orgânica do solo, CTC a capacidade de troca de cátions, SB a soma de bases, V% a saturação por bases, H⁺ e Al³⁺ a acidez potencial do solo, Mg o magnésio disponível, Ca o cálcio disponível, K o potássio disponível.

Em termos de fertilidade do solo (Figura 11), os solos da floresta natural apresentaram uma baixa fertilidade natural e elevada acidez, em acordo com a literatura (Longo et al., 2011a, Costa et al., 2006; Moreira e Malavolta, 2004).

Porém, os valores mais elevados da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) foram obtidos no sistema natural, com as parcelas em Piso de lavra apresentado a condição mais próxima (Figura 11B). A predominância de material arenoso nas camadas superficiais das áreas de rejeito seco, aparentemente não teve um efeito significativo sobre a CTC em relação ao rejeito capeado, visto que valores próximos foram obtidos.

Apesar da ligeira tendência de aumento na CTC, todos os rejeitos apresentaram diminuição nos valores de pH, atingindo valores próximos a referência natural (Figura 11J). Como consequência, a acidez potencial (H^+ e Al^{3+}) apresentou aumento (Figura 11E), e, apesar da diminuição nas Bases trocáveis (Figura 11C), as cargas nutricionais ainda apresentam-se mais elevadas nos solos minerados do que no ambiente de referência, especialmente para o Ca e o Mg (Figura 11F e G).

5.3.2 Análise de correlação

Foram obtidas correlações significativas para diversos parâmetros avaliados (Tabela 10). A MOS e fração fina do solo apresentaram correlações positivas com umidade e CRA. Entretanto, a MOS obteve valor superior em relação à umidade (0,31) enquanto a fração fina em relação a CRA (0,45).

Correlações positivas significativas também foram obtidas entre a idade de plantio e a umidade, CRA, MBC, Desidrogenase, Celulase, SOM, CEC, pH, H^+ e Al^{+3} .

A MOS foi o parâmetro que obteve o maior número de correlações significativas, elevadas para os parâmetros microbiológicos e moderadas com as variáveis ligadas a fertilidade do solo. Todos os nutrientes e a SB apresentaram correlações positivas com MOS (P 0,45, K 0,51, Ca 0,43 e Mg 0,48), não atingindo valores expressivos em relação a textura dos substratos minerados.

A CTC apresentou um comportamento semelhante, sendo apenas correlacionada significativamente a MOS. Como a CTC e a fração fina do solo apresentaram correlações fracas (0,19 a argila e 0,16 para o silte), esses resultados

sugerem um papel de destaque da MOS na disponibilidade de nutrientes e CTC nos solos minerados.

A atividade desidrogenase deveria apresentar forte relação com o carbono orgânico (Blonska et al., 2016). Porém, um valor inexpressivo foi obtido (-0.02). O carbono orgânico também apresentou um resultado diferenciado a literatura, com uma correlação negativa significativa em relação ao qCO_2 (-0,38).

Tabela 10 – Resultados da análise de correlação de Spearman tomando as variáveis bioquímicas, de fertilidade do solo e as características dos locais em recuperação.

Correlação de Spearman	US	CRA	RBS	CBM	qCO2	AD	AC	C-org	P	MOS	CTC	SB	V%	H ⁺ e Al ³⁺	Mg	Ca	K	pH	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Idade plantio
US	1.00	0.73	0.26	0.40	0.07	0.25	0.53	0.11	-0.29	0.31	0.50	-0.10	-0.40	0.56	-0.05	-0.17	0.33	-0.24	0.38	0.32	-0.32	0.37
CRA	0.73	1.00	0.08	0.32	-0.06	0.24	0.36	0.24	-0.18	0.29	0.42	-0.11	-0.34	0.47	-0.06	-0.17	0.17	-0.08	0.45	0.34	-0.40	0.26
RBS	0.26	0.08	1.00	0.54	0.82	0.32	0.43	-0.28	0.09	0.38	0.40	0.04	-0.15	0.40	0.01	0.04	0.33	-0.55	0.05	0.02	-0.03	0.21
CBM	0.40	0.32	0.54	1.00	0.08	0.29	0.30	-0.04	0.08	0.40	0.53	0.00	-0.27	0.56	0.03	-0.02	0.30	-0.43	0.13	0.09	-0.09	0.30
qCO2	0.07	-0.06	0.82	0.08	1.00	0.26	0.40	-0.38	0.10	0.22	0.18	0.02	-0.03	0.17	-0.03	0.04	0.21	-0.46	-0.09	-0.10	0.09	0.15
AD	0.25	0.24	0.32	0.29	0.26	1.00	0.43	-0.02	0.12	0.56	0.51	0.16	-0.11	0.47	0.15	0.15	0.33	-0.28	0.15	0.09	-0.13	0.22
AC	0.53	0.36	0.43	0.30	0.40	0.43	1.00	-0.17	0.03	0.31	0.31	-0.08	-0.21	0.33	-0.02	-0.13	0.26	-0.34	0.16	0.16	-0.14	0.34
C-org	0.11	0.24	-0.28	-0.04	-0.38	-0.02	-0.17	1.00	0.15	0.31	0.33	0.27	0.11	0.26	0.26	0.27	0.14	0.21	0.13	0.19	-0.13	0.08
P	-0.29	-0.18	0.09	0.08	0.10	0.12	0.03	0.15	1.00	0.45	0.26	0.58	0.47	0.06	0.48	0.61	0.27	0.00	-0.19	-0.17	0.14	0.07
MOS	0.31	0.29	0.38	0.40	0.22	0.56	0.31	0.31	0.45	1.00	0.82	0.48	0.07	0.68	0.43	0.48	0.51	-0.35	0.16	0.15	-0.16	0.34
CTC	0.50	0.42	0.40	0.53	0.18	0.51	0.31	0.33	0.26	0.82	1.00	0.33	-0.19	0.93	0.31	0.31	0.50	-0.39	0.19	0.16	-0.16	0.42
SB	-0.10	-0.11	0.04	0.00	0.02	0.16	-0.08	0.27	0.58	0.48	0.33	1.00	0.82	0.02	0.95	0.98	0.28	0.34	-0.14	-0.17	0.12	0.05
V%	-0.40	-0.34	-0.15	-0.27	-0.03	-0.11	-0.21	0.11	0.47	0.07	-0.19	0.82	1.00	-0.50	0.78	0.81	0.03	0.57	-0.21	-0.26	0.19	-0.18
H ⁺ e Al ³⁺	0.56	0.47	0.40	0.56	0.17	0.47	0.33	0.26	0.06	0.68	0.93	0.02	-0.50	1.00	0.02	0.01	0.39	-0.52	0.21	0.21	-0.18	0.46
Mg	-0.05	-0.06	0.01	0.03	-0.03	0.15	-0.02	0.26	0.48	0.43	0.31	0.95	0.78	0.02	1.00	0.88	0.21	0.40	-0.15	-0.19	0.16	0.12
Ca	-0.17	-0.17	0.04	-0.02	0.04	0.15	-0.13	0.27	0.61	0.48	0.31	0.98	0.81	0.01	0.88	1.00	0.26	0.30	-0.14	-0.16	0.11	-0.01
K	0.33	0.17	0.33	0.30	0.21	0.33	0.26	0.14	0.27	0.51	0.50	0.28	0.03	0.39	0.21	0.26	1.00	-0.30	0.10	0.06	-0.10	0.22
pH	-0.24	-0.08	-0.55	-0.43	-0.46	-0.28	-0.34	0.21	0.00	-0.35	-0.39	0.34	0.57	-0.52	0.40	0.30	-0.30	1.00	-0.08	-0.09	0.07	-0.28
Argila (%)	0.38	0.45	0.05	0.13	-0.09	0.15	0.16	0.13	-0.19	0.16	0.19	-0.14	-0.21	0.21	-0.15	-0.14	0.10	-0.08	1.00	0.75	-0.95	0.00
Silte (%)	0.32	0.34	0.02	0.09	-0.10	0.09	0.16	0.19	-0.17	0.15	0.16	-0.17	-0.26	0.21	-0.19	-0.16	0.06	-0.09	0.75	1.00	-0.87	0.11
Areia (%)	-0.32	-0.40	-0.03	-0.09	0.09	-0.13	-0.14	-0.13	0.14	-0.16	-0.16	0.12	0.19	-0.18	0.16	0.11	-0.10	0.07	-0.95	-0.87	1.00	0.06
Idade plantio	0.37	0.26	0.21	0.30	0.15	0.22	0.34	0.08	0.07	0.34	0.42	0.05	-0.18	0.46	0.12	-0.01	0.22	-0.28	0.00	0.11	0.06	1.00

Onde, US representa a umidade do solo, CRA a capacidade de retenção de água, RBS a respiração basal do solo, qCO2 o coeficiente metabólico, AD a atividade desidrogenase, AC a atividade celulase, C-org o carbono orgânico do solo, P o fósforo disponível, MOS o matéria orgânica do solo, CTC a capacidade de troca de cátions, SB a soma de bases, V% a saturação por bases, H⁺ e Al³⁺ a acidez potencial do solo, Mg o magnésio disponível, Ca o cálcio disponível, K o potássio disponível. Os valores em negrito possuem correlações diferentes de zero a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

5.3.3 *Análise de Componentes Principais*

O valor obtido para o teste Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (0,8) demonstrou a adoção de um adequado tamanho amostral para realização da ACP (Hair et al., 1987; Kaiser, 1974). Cinco componentes principais foram consideradas como as mais relevantes na descrição da variabilidade dos solos minerados (Tabela 11), restando 76,3% da variabilidade total.

A primeira componente principal (PC1) apresentou cinco parâmetros com cargas fatoriais elevadas (MOS, CBM, CTC, pH, H^+ e Al^{+3}), alcançando valores superiores ao considerado por Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,55$) na obtenção de descritores importantes para o tamanho amostral empregado.

As cargas fatoriais representam as correlações entre as variáveis e a componente principal. Quando esse valor é alto (positivamente ou negativamente), existe uma maior influência das variáveis na formação da componente principal (CP) (Legendre e Legendre, 2012; Hair Jr. et al., 2010).

Como os componentes principais também conservam parte da variação existente nos dados, particionando a variação retida pelas variáveis que formam a CP, considerando os valores das cargas de fatoriais (Hair Jr. et al., 2010). Assim, na PC1 as variáveis com maiores cargas fatoriais (MOS, CBM, CTC, pH, H^+ e Al^{+3}) também concentram uma maior proporção da variabilidade retida na CP, cerca de 70%, ou 20% da variabilidade total dos substratos minerados (Tabela 6).

Ainda, Desidrogenase, CBM, COS, V%, P e K apresentaram valores abaixo dos considerados como significativos ($\pm 0,55$); todavia, ainda superiores ao mínimo proposto por Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,3$) para compreensão como cargas influentes, restando cerca de 15% da variabilidade da componente, ou 4% da variabilidade total dos dados.

Assim, em concordância com os resultados obtidos na análise de box plot e de correlação, os resultados demonstram que essa componente condensou a variabilidade promovida pelas variações existentes na MOS entre os solos minerados e ao longo do tempo, representando também as consequências relacionadas na CEC, acidificação do solo e atividade microbiana.

Na segunda componente principal (PC2) cargas fatoriais elevadas foram identificadas em quatro variáveis (SB, V%, Mg e Ca). Como V% é derivada da SB e a SB da carga nutricional, há redundância entre essas variáveis, o que explica o

resultado obtido. Ainda, P, MOS e pH apresentaram valores superiores a 0,3, indicando também alguma influência na PC2. Porém, cerca de 80% da variabilidade explicada pela PC2 está relacionada ao SB, V%, Mg e Ca, representando 18,5% da variação total. A MOS, P e pH apresentaram um menor poder explicativo, retendo apenas cerca de 3,5% da variabilidade total.

Esses resultados demonstram que o PC2 condensou as diferenças relacionadas à carga nutricional do solo nos substratos minerados, resultante dos processos de fertilização e calagem química, empregados para a neutralização da acidez nas etapas de preparo do solo (Yada et al., 2015; Ribeiro et al., 2015; Longo et al., 2011).

Na terceira componente principal (PC3) uma elevada porção da variabilidade retida (96,8%) ficou concentrada em três variáveis: a porcentagem de areia, argila e silte, totalizando 13,5% da variabilidade total. A textura dos substratos minerados não apresentou variações temporais, uma vez que os dados foram coletados somente em 2011. Portanto, esse resultado remete apenas as diferenças na textura dos substratos, enquanto nas PC1, PC2, PC4 e PC5 há também influência do tempo, ou evolução dos parâmetros na variação retida.

As cargas fatoriais da quarta componente principal (PC4) sugerem que a variação decorrente da atividade microbiológica dos solos minerados foi retida (cerca de 8% da variabilidade total). Como RBS, qCO_2 , Celulase e Desidrogenase apresentaram maiores cargas positivas e o COS e pH valores negativos, essa componente pode ser interpretada como uma representação dos fenômenos de consumo de COS com aumento da atividade microbiana e aumento da atividade enzimática.

Tabela 11 - Resultados da análise de componentes principais para os dados obtidos nos locais em recuperação considerando as variáveis de fertilidade do solo, propriedades bioquímicas e físicas.

Componentes Principais com Autovalor >1										
Variáveis	PC1		PC2		PC3		PC4		PC5	
	Cargas fatoriais	Variabilidade retida (%)	Cargas fatoriais	Variabilidade retida (%)	Cargas fatoriais	Variabilidade retida (%)	Cargas fatoriais	Variabilidade retida (%)	Cargas fatoriais	Variabilidade retida (%)
Umidade do solo	0.19	0.25	-0.07	0.03	0.08	0.03	0.06	0.01	0.81	1.86
Capacidade de retenção de água	0.16	0.19	-0.05	0.01	0.17	0.15	-0.14	0.06	0.74	1.58
Respiração basal	0.25	0.46	0.03	0.00	0.02	0.00	0.81	1.94	0.03	0.00
Carbono da biomassa microbiana	0.55	2.19	-0.11	0.07	-0.07	0.02	0.18	0.10	0.20	0.11
qCO ₂	-0.02	0	0.08	0.03	-0.01	<0.01	0.90	2.41	-0.04	0.00
Atividade desidrogenase	<i>0.37</i>	<i>1.02</i>	0.16	0.14	0.06	0.02	<i>0.31</i>	0.28	0.21	0.13
Atividade celulase	-0.01	<0.01	0.07	0.02	0.03	0.01	0.56	0.95	0.58	0.95
C-orgânico	<i>0.47</i>	<i>1.59</i>	0.18	0.17	0.10	0.05	-0.69	1.43	0.01	<0.01
P disponível	<i>0.37</i>	<i>1.01</i>	<i>0.53</i>	<i>1.49</i>	-0.02	0.00	0.08	0.02	-0.41	0.48
Matéria orgânica no solo	0.76	4.18	<i>0.37</i>	<i>0.73</i>	0.12	0.07	0.10	0.03	0.02	<0.01
Capacidade de Troca de Cátions	0.87	5.48	0.15	0.12	0.02	0.00	-0.01	<0.01	0.18	0.09
Soma de Bases	0.13	0.12	0.96	4.87	-0.03	0.00	0.00	<0.01	-0.01	<0.01
V%	-0.36	0.92	0.91	4.44	-0.01	<0.01	0.05	0.01	-0.11	0.04
H+Al	0.88	5.62	-0.17	0.16	-0.01	<0.01	-0.04	0.00	0.20	0.12
Mg disponível	0.06	0.03	0.93	4.63	-0.10	0.05	-0.03	0.00	0.15	0.06
Ca disponível	0.16	0.19	0.92	4.53	0.01	<0.01	0.00	<0.01	-0.12	0.04
K disponível	<i>0.49</i>	<i>1.76</i>	0.23	0.28	0.06	0.02	0.19	0.11	0.05	0.01
pH	-0.58	2.48	<i>0.50</i>	<i>1.32</i>	-0.02	0.00	<i>-0.43</i>	<i>0.54</i>	0.23	0.15
% de argila	-0.04	0.01	0.00	<0.01	0.93	4.30	0.01	<0.01	0.08	0.02
% de silte	0.02	0	-0.07	0.03	0.91	4.17	-0.04	0.00	-0.04	0.01
% de areia	0.04	0.01	-0.02	0.00	-1.00	5.03	-0.02	<0.01	0.02	<0.01
Autovalor	5.78		4.85		2.93		1.66		1.18	
Variabilidade retida (%)	27.53		23.09		13.95		7.90		5.64	
Variabilidade acumulada (%)	27.53		50.63		64.58		72.47		78.11	

*Valores em negrito denotam cargas fatoriais e respectivos valores de variabilidade retida significativos para o tamanho amostral empregado, de acordo com Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,55$). Valores em itálico denotam cargas fatoriais e respectivos valores de variabilidade retida superiores ao valor mínimo estabelecido por Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,3$) para análise da componente principal.

5.4 Discussão

5.4.1 *Variação ambiental, Atividade microbiológica e Supressividade do solo*

A atividade microbiana e enzimática são reconhecidas como indicadores consagrados da qualidade de solos, representando o ciclo de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, estabelecimento de ciclos biogeoquímicos, agregação e o desenvolvimento da vida no perfil do solo (Fereidooni et al., 2013; Suzyan et al., 2011; Pascual et al., 2000).

Os resultados obtidos demonstraram expressivas diferenças entre os solos minerados e a condição natural. Valores elevados de qCO_2 foram obtidos para os locais em recuperação, indicando uma condição ambiental adversa a comunidade microbiana, onde é necessário mais C para sua manutenção (Souza et al., 2006).

Esse parâmetro mede a eficiência com que a biomassa microbiana do solo assimila C disponível para biossíntese celular, sendo sensivelmente afetado por alterações na composição da população microbiana, disponibilidade de substratos e outros fatores abióticos (Yada et al., 2015; Fereidooni et al., 2013). Em contrapartida, a referência natural apresentou valores mais baixos de qCO_2 , onde menos carbono é disperso em forma de dióxido de carbono pela respiração microbiana, com fração significativa incorporada no tecido microbiano, conseqüentemente, indicando um estado de estabilidade.

Eventos recentes de seca severa foram relatados para a Amazônia brasileira em 2005 e 2010 (van der Laan-Luijkx et al., 2015, Lewis et al., 2011, Xu et al., 2011, Phillips et al., 2009, 2010). Esses eventos causaram fortes desvios em relação aos aumentos positivos da biomassa em longo prazo, medidos nas duas décadas anteriores, de acordo com levantamentos florestais baseados no solo da RAINFOR, e também levaram a um crescimento reduzido e ao aumento da mortalidade de árvores nos anos que se seguiram aos eventos de seca. Outra seca extrema foi relatada em 2015 (Jiménez-Muñoz, 2016), com os dados sugerindo seu início em 2014.

Conforme observado, as diferenças no qCO_2 entre os solos minerados e as parcelas naturais sugerem que a diminuição da precipitação em 2014 (BDMEP / INMET, 2017) pode ter resultado em comportamentos diferenciados dos parâmetros

nessas condições ambientais. Observou-se o também o aumento nos valores do qCO_2 nos solo minerados, acompanhado pelo aumento nos valores da CBM e RBS. Entretanto, as áreas naturais mantiveram valores próximos os anos anteriores, apesar da variabilidade existente entre as parcelas.

Por outro lado, o carbono orgânico do solo (COS) mostrou uma expressiva redução nas parcelas localizadas sobre os substratos minerados, tendência diferenciada a condição natural, que manteve valores históricos próximos, com um ligeiro aumento. Esse parâmetro tem sua sensibilidade atribuída a modificações nas condições ambientais, devido a sua constituição, que contém basicamente matéria orgânica derivada da vegetação, resíduos da macrofauna e microbiota do solo (Raheb et al., 2017).

Portanto apresenta uma maior facilidade de decomposição, resultando em uma maior variabilidade em relação a outras frações orgânicas, como a MOS (Souza et al., 2006). Como o Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) apresentou tendência de aumento ao longo do tempo nos solos minerados, há um indicativo de aumento na atividade decompositora nos anos avaliados (Longo et al., 2011a).

Entretanto, como a MOS representa fonte de energia e C para microorganismos do solo, como bactérias e fungos (Sofi et al., 2016), o distúrbio promovido pelas condições climáticas de 2014 pode ter resultado em um consumo do substrato orgânico, o que explicaria a redução MOS e o aumento de CBM, mesmo nas parcelas naturais. Assim, em 2014 o aumento dos valores do CBM podem ter sido catalisado pelas condições climáticas, o que explicaria as tendências observadas nos resultados.

A atividade enzimática também demonstrou um desenvolvimento positivo nos solos minerados, alcançando correlações positivas e significativas com a idade de plantio e atingindo o patamar de valores existentes no ambiente de referência.

A celulase representa uma enzima proveniente da biomassa vegetal, um produto da fotossíntese, encontrado nas paredes celulares das plantas (Behera et al., 2016). No solo ela se encontra presente principalmente através de resíduos vegetais e, em menor quantidade, derivada de fungos e bactérias. Já a atividade desidrogenase está relacionada à quantidade de substratos biodegradáveis e ao conteúdo de C lábil que estimulam a atividade microbiana (Tejada et al., 2009), sendo afetada por vários fatores (tipo de solo, pH e outros) e envolvida na ruptura inicial da matéria orgânica do solo (Bolton et al., 1985).

Em geral, os valores baixos dessas enzimas estão relacionados à degradação do solo, como consequência de níveis baixos da atividade microbiana (Pascual et al., 2000). Porém, os resultados demonstraram que as parcelas mineradas alcançaram valores superiores ao ambiente de referência, portanto, sugerem o aumento da ciclagem de nutrientes ao longo do tempo nos locais em recuperação.

Entretanto, o rejeito capeado, apesar da maior fração fina em relação ao rejeito seco, apresentou menor atividade enzimática, com uma elevada quantidade de parcelas assumindo valores inferiores à floresta natural em 2014.

A desidrogenase apresentou grandes variações nas amostras e correlações fracas com os outros parâmetros avaliados, resultando em valores baixos nas cargas fatoriais das componentes principais. Como esta enzima é sensível a alterações das propriedades do solo (Longo et al., 2011a) e foram observadas tendências estáveis identificadas ao longo do tempo nas parcelas naturais, a elevada variabilidade nos rejeitos minerados sugere que a comunidade microbiana dos substratos ainda se encontra em desenvolvimento.

5.4.2 *Dano ambiental e recuperação de áreas degradadas*

Em geral, as parcelas em piso de lavra tenderam a apresentar resultados mais próximos ao sistema de referência. Esse substrato é resultante de processos de terraplenagem em solo superficial, ou em situações de exposição de encostas, construção de barragens, estradas de acesso e outras operações que requerem escavação, remoção ou aterro do solo (Ribeiro et al., 2015). Portanto, apesar da eliminação dos horizontes orgânicos e estrutura do solo, há a conservação de algumas características do solo original, principalmente relacionadas à composição mineralógica e material de origem.

A utilização do *top soil* no rejeito capeado não resultou em expressivas diferenças em relação ao rejeito seco, apesar da sua composição textural mais próxima à natural. Entretanto, as camadas mais profundas desse substrato podem apresentar características diferenciadas, dependentes do material desconhecido depositado ao longo do processo de mineração, o que explicaria a equivalência entre seus resultados os obtidos em relação ao rejeito seco.

Por sua vez o rejeito seco apresentou a predominância de material arenoso, de 65% a 90% de composição arenosa. Esse rejeito é composto por um material

heterogêneo, resultante da planta de mineração e utilizado no preenchimento de locais onde o minério fora removido (Ribeiro et al., 2015). E embora os resultados similares em relação ao rejeito capeado possam ser atribuídos a composição do material em profundidade, há ainda a influência dos métodos de recuperação nos resultados obtidos. Como a definição de ações baseou-se em uma avaliação de dano ambiental, com várias ações implementadas antes do plantio, incluindo o uso de compostagem, associadas à adubação verde, de fertilizantes químicos e calagem, as ações tomadas podem ter compensado o maior dano ambiental dos rejeitos secos, principalmente pelo incremento de matéria orgânica, e, conseqüentemente, uma maior atividade microbiológica.

Em solos tropicais, a MOS representa a maior fonte de CTC de solo (Carneis Filho et al., 2017; Malavolta, 2006; Faquin, 2005), responsável em argissolos brasileiros por cerca de 74 a 90% da CTC total do solo (Sá et al., 2009). Portanto, os resultados sugerem que a evolução positiva da MOS nos rejeitos secos promoveu uma importante melhoria nas propriedades do solo, possibilitando a obtenção de resultados positivos em uma condição extremamente adversa. Ainda, esses substratos apresentaram uma maior disponibilidade de nutrientes em relação ao piso de lavra.

Como, em geral, as recomendações de fertilidade e calagem do solo no Brasil são direcionadas a neutralização da acidez potencial do solo (H^+ e Al^{+3} trocáveis) (Ebeling et al., 2008), os valores mais elevados de Ca e Mg provavelmente estão relacionados a adubação química. Conseqüentemente, à medida que as áreas de piso de lavra apresentaram melhores resultados no desenvolvimento fitossociológico (Ribeiro et al., 2016) careceram de menor esforço em comparação as áreas de rejeito seco e capeado, o que explicaria os resultados obtidos.

5.5 Conclusões

Os resultados deste trabalho revelaram a dinâmica de propriedades de substratos minerados no processo de recuperação de áreas degradadas pela mineração na Amazônia brasileira. Sua comparação com o ecossistema de referência permitiu o entendimento sobre a eficácia das ações de recuperação em áreas mineradas de regiões tropicais, bem como as limitações envolvidas.

A matéria orgânica do solo nos horizontes superficiais desempenhou um papel fundamental, destacando a importância das ações iniciais de preparo do solo preliminarmente a revegetação. Observaram-se respostas diferenciadas da comunidade microbiana a uma variação climática inesperada.

Apesar de melhores condições nutricionais, os locais minerados mostraram-se mais sensíveis às variações climáticas, resultando em aumentos substanciais no CO₂ emitido pela respiração do solo. Porém, futuros estudos são necessários para confirmação dos mecanismos envolvidos nos processos de ciclagem de carbono e emissões de CO₂ a atmosfera.

Os parâmetros avaliados mostraram-se sensíveis a diversos aspectos do processo de recuperação do solo, fornecendo suporte para o desenvolvimento de índices de qualidade e diretrizes de monitoramento.

6 ÍNDICES ADIMENSIONAIS COMO INDICADORES DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

6.1 Introdução

Vários indicadores vêm sendo estudados na avaliação dos resultados obtidos no processo de recuperação de áreas degradadas, geralmente relacionados a composição florística e propagação de espécies (Aynekulu et al., 2016; Lima et al., 2016; Mukhopadhyaya et al., 2013; Parrotta e Kwnowles , 2001). Porém, em locais degradados pela mineração, há uma significativa influência das propriedades dos solos minerados nos ecossistemas formados, uma vez que as alterações físicas, químicas e microbiológicas resultam em condições de suporte ecossistêmico diferenciado em relação ao ambiente natural (Lei et al., 2016; Ribeiro; 2016; Yada et al., 2015; Mukhopadhyaya et al., 2014; Xiao et al., 2014) ;.

Particularmente na mineração de superfície, mudanças significativas ocorrem na paisagem e nos componentes ambientais (Mukhopadhyay, 2014). Como o processo de extração do minério normalmente demanda escavação e processamento do material removido há a produção de rejeitos, que normalmente são depositados nos locais de extração, criando substratos com predominância de material mineral, pedregulhos e fragmentos de rochas, desprovidos de matéria orgânica e nutrientes (Luna et al., 2016; Stanturf, et al., 2014; Bradshaw, 2000).

Nesse contexto, o restabelecimento dos processos ecossistêmicos pré-existent, principalmente em sua totalidade, representa um grande desafio técnico, inclusive com limitações teóricas acerca da complexidade do sistema ambiental. Na literatura abordagens sistêmicas tem sido destacadas como a solução a essa problemática, com a avaliação de diversas propriedades do meio e suas inter-relações para mensurar o estado de ecossistemas recuperados (Lei et al., 2016; Philips et al., 2016; Lima et al. . 2016; Ribeiro et al., 2016; Poncelet et al., 2014; Stanturf et al., 2014).

Antagonicamente, esses pressupostos resultam em dificuldades no estabelecimento de regras gerais e definições abrangentes para avaliação de ambientes em recuperação, uma vez que as propriedades ambientais não têm necessariamente o mesmo comportamento ou importância em diferentes ecossistemas e condições ambientais.

Sob esse aspecto, a modelagem com Análise Dimensional pode resultar em uma nova perspectiva sobre este tópico, preenchendo a lacuna existente. Essa forma de análise trata as formas gerais de equações que descrevem fenômenos naturais com grande capacidade de generalização e simplicidade matemática (Langhaar, 1951). A representação dos fenômenos é construída apenas por considerações sobre as dimensões físicas, não exigindo a existência de uma teoria consolidada ou suporte empírico (Martins, 2004).

Um aspecto-chave para a análise dimensional é a sua capacidade de integrar, ou tornar mais sucinta, a forma funcional das relações físicas (Sonin, 2001), com base no princípio fundamental da homogeneidade dimensional. Isso permite combinar um conjunto de variáveis para formar produtos sem dimensões, através do teorema π (Pi) (Legendre e Legendre, 2012). Além disso, a análise dimensional também é orientada pelo conceito de similaridade, permitindo a equivalência de diferentes condições físicas na comparação de condições aparentemente distintas (Sonin, 2001).

Entretanto, apenas as variáveis pertinentes ao fenômeno em estudo devem ser consideradas e há necessidade do conhecimento das relações entre as variáveis dependentes e independentes a priori (Legendre e Legendre, 2012). Portanto, considerando-se a base de conhecimento obtida nos capítulos anteriores, se desenvolveu uma abordagem baseada na Análise Dimensional das variáveis físicas, químicas e biológicas de locais minerados em recuperação a fim de explorar o potencial da análise e o comportamento dos índices adimensionais na avaliação de ambientes minerados em relação ao ecossistema de referência.

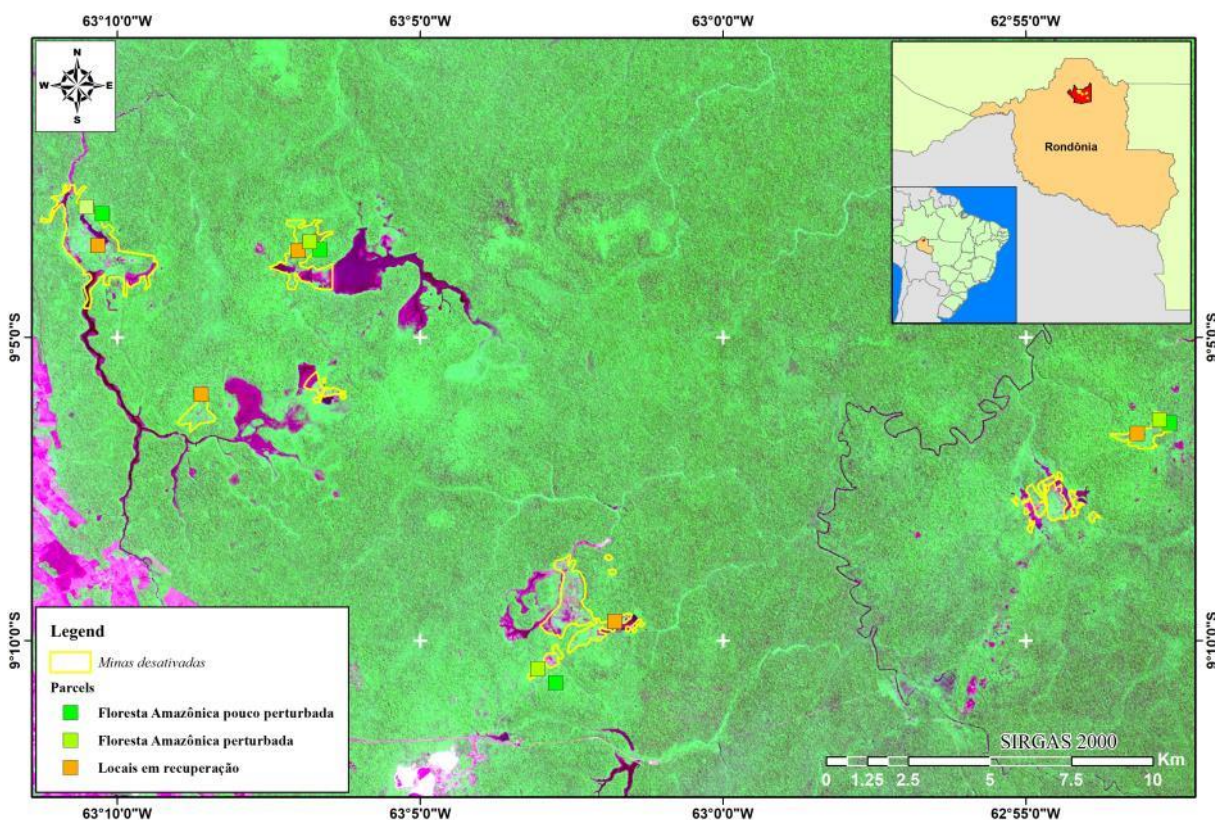
6.2 Metodologia

6.2.1 Delineamento empregado

O estudo foi realizado tomando dados e variáveis selecionadas nos estudos preliminares e em outras atividades de pesquisa realizadas nos solos minerados da Floresta Nacional do Jamari (Ribeiro et al, 2016; Ribeiro et al., 2015; Yada, et al. 2015; Mello, 2015; Longo et al, 2011; Longo et al, 2011a; Ribeiro et al, 2006; Longo et al., 2005; Ribeiro et al, 2004), envolvendo 7 parcelas de monitoramento (50m

x50m), distribuídas em 5 minas (Tabela 12) em recuperação (Figura 12) e com dados adquiridos em 2014 (Tabela 13 e 14).

Figura 12 – Localização das parcelas amostradas para os parâmetros químicos e microbiológicos.



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

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

Tabela 12 – Principais Características dos locais minerados.

Amostras	Substrato	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Idade de plantio (2014)
Parcela 1 -Mina 1	Piso de lavra	48	30.2	21.8	9 anos
Parcela 1 -Mina 2	Washing Plant	4.7	0.2	95.1	12 anos
Parcela 1 -Mina 3	Rejeito Seco	17.5	6.3	76.2	22 anos
Parcela 1 -Mina 4	Rejeito Capeado	50.8	14.2	35.1	19 anos
Parcela 1 -Mina 5	Piso de lavra	55.7	11.2	33.1	14 anos
Parcela 1 -Mina 6	Rejeito Seco	2.3	2.9	94.8	8 anos
Parcela 2 -Mina 6	Piso de lavra	55.7	11.2	33.1	8 anos

Tabela 13 – Amostras e variáveis relacionadas ao solo empregadas na análise dimensional.

<i>Amostras</i>	<i>AC</i> (<i>mg TFF kg⁻¹ h⁻¹</i>)	<i>RBS</i> (<i>mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹</i>)	<i>CBM</i> (<i>mg C kg⁻¹</i>)	<i>CTC (mmolc/dm³)</i>	<i>SB (mmolc/dm³)</i>	<i>MOS (g/dm³)</i>	<i>Ds (g/cm³)</i>	<i>DMG (mm)</i>
Parcela 1 -Mina 1	14.7±3.5	6.0±0.4	567.5±297.9	61.8±29	4.8±3	19±6	1.4±0.1	2.5
Parcela 1 –Mina 2	13.8±0.5	13.0±0.5	626.9±348.6	42.8±21	3.2±2	13.7±5	1.5±0.2	2.8
Parcela 1 -Mina 3	12.3±6.1	10.6±0.1	655.7±35.8	51.3±14	14.3±6	20±7	1.4±0.2	1.9
Parcela 1 -Mina 4	25.8±8	13.4±0.5	855.9±317	40.8±14	3.13±1	15±6	1.3±0.1	2.8
Parcela 1 -Mina 5	33.8±5.7	10.8±0.5	774.4±311.2	59.7±26	4.37±2	18.337±7	1.2±0.1	2.1
Parcela 1 -Mina 6	13±8.3	19.5±0.2	761.1±117.9	71±43	3±1	21±13	1.5±0.1	1.6
Parcela 2 -Mina 6	13.8±4.3	19.7±0.3	849.8±133.8	48±14	3.67±2	15.33±2	1.4±0.2	2.6
Floresta Amazônica pouco perturbada	23.9±8.8	1.8±0.6	999.5±126.1	58.7±27.2	2.7±1.1	16.5±5.8	1.3±0.1	3.4
Floresta Amazônica perturbada	14.9±3.7	1.8±0.5	934.6±172.6	137±47.4	2.8±0.7	29.8±7.3	1.1±0.1	3.2

Onde, AC representa a atividade celulase, RBS a respiração basal do solo, CBM o carbono da biomassa microbiana, MOS a matéria orgânica do solo, CTC a capacidade de troca de cátions, SB a soma de bases, Ds a densidade aparente do solo, DMG o diâmetro médio geométrico dos agregados do solo.

Tabela 14 – Amostras e variáveis relacionadas a meio biótico empregadas na análise dimensional.

<i>Amostras</i>	<i>Altura media arbórea</i>	<i>Diâmetro da altura do peito (m)</i>	<i>Altura da serrapilheira (cm)</i>	<i>Riqueza de espécies arbórea (espécies/m²)</i>	<i>Densidade arbórea (indiv./ha)</i>	<i>Estoque de carbono (Mg/ha)</i>	<i>Regeneração natural arbórea (Indiv./m²)</i>	<i>Biomassa epígea (Mg/ha)</i>	<i>Riqueza total da Macrofauna (espécies/m²)</i>	<i>Riqueza de espécies arbórea por ind. amostrado (indiv./ha)</i>
Parcela 1 -Mina 1	14.7	4.4	6.8	3.6	292.5	945.5	54625.0	2101.0	6.0	0.2
Parcela 1 –Mina 2	9.8	3.3	1.9	3.6	420.0	283.5	23110.0	630.0	6.0	0.3
Parcela 1 -Mina 3	16.3	3.4	2.7	6.4	270.0	740.5	17242.0	1645.6	6.0	0.3
Parcela 1 -Mina 4	16.5	2.5	9.8	3.8	187.5	335.2	63948.8	744.9	4.0	0.1
Parcela 1 -Mina 5	19.8	3.9	0.3	6.6	295.0	1684.3	85940.0	3742.8	4.0	0.2
Parcela 1 -Mina 6	11.3	2.6	4.0	12.4	300.0	205.8	108500.0	457.2	3.0	0.3
Parcela 2 -Mina 6	12.0	4.0	6.1	5.2	310.0	493.5	93200.0	1096.7	3.0	0.1
Floresta Amazônica pouco perturbada	23.1	5.9	1.5	15.9	473.3	8241.8	22927.8	18315.1	4.0	0.5
Floresta Amazônica perturbada	14.1	4.3	3.6	9.0	435.2	1556.3	24303.7	3458.5	4.0	0.4

6.2.2 Coleta e análises de solo

As coletas de solo foram realizadas seguindo o procedimento de amostragem composta aleatória em três sub parcelas de 10mx10m. Em cada sub parcela foram realizadas cinco sub amostras de aproximadamente 1,5kg, na profundidade de 0-0,2m. Após a coleta, 0,5 kg das amostras foram destinadas para a avaliação das propriedades microbiológicas do solo, com transporte realizado em caixas refrigeradas e armazenamento a 4°C até análise laboratorial. As destinadas a análises físico-químicas (0,5 kg de solo por parcela) foram secas ao ar à temperatura ambiente (30 a 35 ° C), levemente trituradas e peneiradas (2 mm de diâmetro da peneira).

As amostras utilizadas no estudo de agregação (0,5 kg de solo por parcela) foram secas ao ar à temperatura ambiente e peneirada em peneiras de diâmetro 6,3, 4,75, 4, 2, 1 e 0,5 mm, com a massa retida utilizada na determinação do Diâmetro Médio Geométrico DMG (Equação 3, Mazurak, 1950).

$$DMG = 10 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i \times \log_{10} d_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \right] \quad (3)$$

Onde,

- n é o número de classes de tamanho de agregados;
- Xi é a massa da classe i;
- Di é a média aritmética dos limites inferior e superior da classe.

Para a densidade do solo (Equação 4), quatro anéis volumétricos foram empregados em cada parcela, posteriormente secos a 105 °C durante cinco dias em estufa.

$$D_t = \frac{m_a}{v_a} \quad (4)$$

Onde,

- Dt é a densidade do solo;
- Ma corresponde a massa do solo contido no anel de volume Va.

Todas as análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Biogeoquímica pertence ao Departamento de Tecnologia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal e no Instituto de Tecnologia de Sorocaba, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), conforme os procedimentos padrões da Tabela 4.

6.2.3 Coleta e análises de dados biológicos

Os parâmetros da vegetação foram avaliados em parcelas de 50 x 50 m. A altura média e área basal (Equação 1) foram mensuradas para indivíduos com diâmetro em altura do peito (DAP) superior a 10 cm. Na determinação da riqueza média de espécies, foram computados os valores do número total de espécies amostradas nas parcelas de 50mx50m com DAP inferior a 3 cm. Os indivíduos regenerantes, foram contabilizados em sub-parcelas de 10mx10m, posicionadas no interior das parcelas de 50mx50m, com contagem do número de indivíduos com DAP entre 3cm e 10cm. Para fins de comparação entre os locais em recuperação e os ambientes naturais foram extrapolados os valores de indivíduos regenerantes para indivíduos/m².

A estimativa de biomassa e estoque de carbono foi determinada a fim de aumentar o número de produtos adimensionais gerados na análise. Seu cálculo foi realizado pelo modelo proposto por Higuchi et al. (1998) para floresta de terra-firme sobre platôs de Latossolo amarelo, posteriormente utilizado em Bolfe (2010) (Equação 5 e 6). A biomassa foi convertida em estoque de carbono, multiplicando-a pela constante 0,45 (Bolfe, 2010; Higuchi et al., 1998).

$$EA1 = 0,0336 \times DAP^{2,171} \times H^{1,038} \times 0,6 \quad (5)$$

$$EA2 = 0,00009 \times DAP^{1,585} \times H^{2,651} \times 0,6 \quad (6)$$

Onde,

- EA1 é a equação alométrica para indivíduos com DAP superior a 20cm;
- EA2 é a equação alométrica para indivíduos com DAP inferior a 20cm.

O perfil da serapilheira foi determinado com auxílio de um perfilômetro analógico e através do método proposto em Mello (2015) para quatro locais inseridos nas parcelas avaliadas.

A riqueza da macrofauna do solo foi mensurada através da contabilização do número de espécies amostradas de invertebrados com tamanho corporal igual ou superior a 10,0 mm de comprimento ou entre 2,0 mm e 20,0 mm de diâmetro. Todas as amostras foram feitas em abril de 2014, com a coleta realizada nas mesmas parcelas de 50x50m, usando armadilhas pitfall (Figura 13).

Para amostragem, as parcelas foram subdivididas em quatro sub parcelas, nas quais as armadilhas foram posicionadas, em transepto, a cada 5m. As armadilhas foram confeccionadas com vasos de mel herméticos, com 10 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Cada armadilha foi enterrada mantendo uma abertura ao nível da superfície do solo. Utilizou-se aproximadamente 200 ml de formalina a 4% com a tampa dos recipientes alocada cerca de 10 cm cima da armadilha de maneira a reduzir o efeito de evaporação da solução conservante.

Figura 13 – Armadilha pitfall instalada.



Fonte: Mello (2015).

Após levantamento dos indivíduos e identificação da espécie, foi calculado o valor médio para cada sub parcela, resultando em quatro valores de espécie por parcela.

6.2.4 Cálculo dos índices adimensionais

Utilizou-se uma adaptação da metodologia utilizada por Albiero (2006) e Legendre e Legendre (2012) na determinação dos produtos adimensionais, através da abordagem sistemática de cálculo. As dimensões relacionadas à massa, comprimento e tempo das variáveis selecionadas foram convertidas para o sistema de unidades CSG (Tabela 15). Como variáveis de vários componentes ambientais foram empregadas, incluindo o sistema biológico, foi necessário incluir espécies e indivíduos como dimensões.

Tabela 15 – Indicadores empregados na confecção de índices através da Análise Dimensional.

Grupo de variáveis	Indicadores	Dimensão obtida	Fator de conversão	Dimensão convertida (CSG)
Bioquímicas	<i>Carbono da Biomassa Microbiana</i>	mg C/kg	/1000000	g/cm ³
	<i>Celulase</i>	mg Glicose/kg.h	/3600000000	g/cm ³ .s
	<i>Respiração Basal</i>	mg CO ₂ /kg.h	/3600000000	g/cm ³ .s
Fauna	<i>Riqueza de espécies da macrofauna</i>	Espécies	1	Espécies
Fitossociológicas	<i>Riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado</i>	Espécie/indivíduo	1	Espécie/indivíduo
	<i>Altura média do estrato arbóreo</i>	m	100	cm
	<i>Diâmetro da altura do peito</i>	m	100	cm
	<i>Riqueza de espécies arbóreas</i>	Espécies/m ²	/10000	Espécies/cm ²
	<i>Densidade arbórea</i>	Indivíduo/ha	/100000000	Indivíduo/cm ²
	<i>Regeneração natural arbórea</i>	Indivíduo/ha	/100000000	Indivíduo/cm ²
	<i>Altura da serapilheira</i>	Cm	1	cm
Estimativas alométricas	<i>Biomassa Epígea</i>	t/ha	/100	g/cm ²
	<i>Estoque de carbono</i>	t/ha	/100	g/cm ²
Física do solo	<i>Diâmetro médio geométrico</i>	mm	/10	cm
	<i>Densidade do solo</i>	g/cm ³	1	g/cm ³
Fertilidade do solo	<i>Capacidade de Troca de Cátions*</i>	mmolc/dm ³	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +K ¹)/10000	g/cm ³
	<i>Matéria Orgânica</i>	mg/dm ³	/1000000	g/cm ³
	<i>Soma de Bases*</i>	mmolc/dm ³	(Ca ²⁺ +Mg ²⁺ +K ¹ +S+Al ³)/10000	g/cm ³

*Calculado através da multiplicação pelo peso atômico, valência e divisão pelo fator de conversão.

Em seguida, as dimensões de cada variável foram decompostas em função da massa (M), comprimento (L), Tempo (T), Espécie (S) e Indivíduo (I); resultando na uma matriz dimensional (Tabela 3). Os números na matriz dimensional representam cada expoente relacionado às dimensões dos indicadores ambientais empregados nesse estudo.

Tabela 16 –. Matriz dimensional derivada dos indicadores de recuperação selecionados para a Análise Dimensional.

Grupo de variáveis	Indicadores		Dimensões básicas				
			Massa	Comprimento	Tempo	Indivíduo	Espécie
Bioquímicas	V1	Carbono da Biomassa Microbiana	1	-3	0	0	0
	V2	Celulase	1	-3	-1	0	0
	V3	Respiração Basal	1	-3	-1	0	0
Fauna	V4	Riqueza de espécies da macrofauna	0	0	0	0	1
Fitossociológicas	V5	Riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado	0	0	0	-1	1
	V6	Altura média do estrato arbóreo	0	1	0	0	0
	V7	Diâmetro da altura do peito	0	1	0	0	0
	V8	Riqueza de espécies arbóreas	0	-2	0	0	1
	V9	Densidade arbórea	0	-2	0	1	0
	V10	Regeneração natural arbórea	0	-2	0	1	0
	V11	Altura da serapilheira	0	1	0	0	0
Estimativas alométricas	V12	Biomassa Epígea	1	-2	0	0	0
	V13	Estoque de carbono	1	-2	0	0	0
Física do solo	V14	Diâmetro médio geométrico	0	1	0	0	0
	V15	Densidade do solo	1	-3	0	0	0
Fertilidade do solo	V16	Capacidade de Troca de Cátions	1	-3	0	0	0
	V17	Matéria Orgânica	1	-3	0	0	0
	V18	Soma de Bases	1	-3	0	0	0

Para determinar os produtos adimensionais, os expoentes da matriz dimensional foram combinados, através da multiplicação, divisão e (ou) potenciação. Como uma abordagem sistemática de cálculo foi adotada, determinou-se os expoentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{21}$ das 21 variáveis de tal forma que seu produto (Π) é um número adimensional (Equação 7).

$$\Pi = V_1^{x_1} * V_2^{x_2} * V_3^{x_3} * \dots V_n^{x_n} \quad (7)$$

Onde,

- Π corresponde a função adimensional que descreve o fenômeno;
- $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ correspondem as variáveis adimensionais;
- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ correspondem aos expoentes das variáveis: $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$, respectivamente, que permitem que π seja adimensional.

Para encontrar uma solução para os expoentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{21}$, as variáveis foram decompostas pelas suas características dimensionais básicas (Equação 8).

$$\Pi = (M^{a_1} L^{b_1} T^{c_1} S^{d_1} I^{e_1})^{x_1} \times (M^{a_2} L^{b_2} T^{c_2} S^{d_2} I^{e_2})^{x_2} \times (M^{a_3} L^{b_3} T^{c_3} S^{d_3} I^{e_3})^{x_3} \times \dots \times (M^{a_n} L^{b_n} T^{c_n} S^{d_n} I^{e_n})^{x_n} \quad (8)$$

Ao desenvolver a equação 8 tem-se:

$$\begin{aligned} \Pi = & M^{(a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n)} \times L^{(b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n)} \times T^{(c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_n x_n)} \\ & \times S^{(d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_3 x_3 + \dots + d_n x_n)} \times I^{(e_1 x_1 + e_2 x_2 + e_3 x_3 + \dots + e_n x_n)} \end{aligned} \quad (9)$$

Como os produtos de Π são adimensionais, os expoentes de cada dimensão (M, L, T, S e I) deve ser zero, permitindo, portanto, a obtenção de um sistema de equações conforme a Equação 10.

$$\begin{aligned} a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n &= 0 \\ b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_n x_n &= 0 \\ c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_n x_n &= 0 \\ d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_3 x_3 + \dots + d_n x_n &= 0 \\ e_1 x_1 + e_2 x_2 + e_3 x_3 + \dots + e_n x_n &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Este sistema de equações pode ser escrito em uma notação matricial como a Equação 11.

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n \\ b_1 & b_2 & b_3 & \dots & b_n \\ c_1 & c_2 & c_3 & \dots & c_n \\ d_1 & d_2 & d_3 & \dots & d_n \\ e_1 & e_2 & e_3 & \dots & e_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

Considerando as 21 variáveis, esse sistema de equações apresenta um número maior de incógnitas do que equações, sendo indeterminado. Portanto, para solucioná-lo, o método geral de inversão da matriz foi empregado (Legendre & Legendre, 2012a).

A matriz dimensional apresentou posto de valor igual a 5. Portanto, é possível encontrar um subespaço com tamanho 5x5 na matriz dimensional que apresente determinante diferente de zero, e, portanto, resolver o sistema de equações indeterminado. Sua seleção representa um passo importante na Análise Dimensional, pois as colunas selecionadas da matriz dimensional (variáveis) serão combinadas para todas as outras variáveis para formar produtos adimensionais, sendo independentes uma das outras (não combinadas entre si).

Para criar produtos adimensionais que sintetizam a maior parte das possíveis informações sobre os diferentes componentes ambientais (físicos, químicos e biológicos), o subespaço representado pelas variáveis V16, V17, V18, V19 e V20, com determinante diferente de zero (-2), foi selecionado (Tabela 9). Outros subespaços poderiam ser escolhidos, inclusive, com o mesmo valor determinante, todavia, melhores resultados foram obtidos de maneira a condensar a informação dos indicadores dos diferentes componentes ambientais através do sub espaço selecionado.

Tabela 17 –. Subespaço da Matriz dimensional, com determinante diferente de zero selecionado para a resolução do sistema de equações.

Dimensões básicas	Regeneração natural arbórea	Biomassa epígea	Respiração Basal	Riqueza de espécies da macrofauna	Riqueza arbórea por indivíduo amostrado
	V12	V14	V5	V6	V7
Massa	0	1	1	0	0
Comprimento	-2	-2	-3	0	0
Tempo	0	0	-1	0	0
Indivíduo	1	0	0	0	-1
Espécie	0	0	0	1	1

Para resolver o sistema de equações, o subespaço selecionado (S) foi invertido, multiplicado pela matriz remanescente da matriz dimensional (R), resultando na matriz de solução (A) (Equação 12).

$$A = S^{-1} \times (-1 \times R) \quad (12)$$

Os produtos dimensionais foram obtidos combinando a matriz identidade de R com matriz de solução transposta (A) (Tabela 18).

Tabela 18 –Matriz solução obtida a partir do sub espaço selecionado, matriz identidade e Pi termos obtidos.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20
Pi1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Pi4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
Pi5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-1	0	0,5	-0,5
Pi9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	-0,5	0,5
Pi10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,5	0	0	-0,5	0,5
Pi11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,5	0	0	-0,5	0,5
Pi12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,5	0	0	-0,5	0,5
Pi13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	-1
Pi14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
Pi15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0

6.2.5 Análises estatísticas

Os valores dos produtos adimensionais foram calculados para as sete parcelas de locais minerados e para o sistema de referência de floresta amazônica pouco perturbada e perturbada. Adotou-se a análise de correlação de Kendall ($p < 0,05$ e $0,001$) e a Análise de Componentes Principais para avaliar o grau de redundância dos produtos adimensionais e seu poder explicativo frente às diferenças existentes nos locais avaliados.

Os valores médios foram utilizados e devido às diferenças na grandeza dimensional entre todas as variáveis e produtos adimensionais realizou-se a padronização dos valores através da função z-escores (Equação 2).

Somente as Componentes Principais (CPs) com autovalores ≥ 1 e explicando pelo menos 5% da variação total (Mukhopadhyay et al., 2014) foram examinadas. A rotação OBLIMIN foi empregada para redistribuir a variância nas CPs e as variáveis com cargas fatoriais que alcançaram pelo menos $\pm 0,40$ foram analisadas (Hair Jr. et al., 2010).

O cálculo dos produtos adimensionais foi realizado no Microsoft Excel e todas análises estatísticas no programa R (R Core Team 2017), utilizando os pacotes:

ggplot2 (Wickham, 2009), Hmisc (Harrell Jr. and Dupont, 2016), FactoMineR (Le et al., 2008), factoextra (Kassambara and Mundt, 2017); além das rotinas STHDA (2017, 2017a and 2017b).

6.3 Resultados

6.3.1 *Análise dos produtos adimensionais obtidos*

O primeiro produto adimensional (Pi1) representa um índice que engloba cinco variáveis do sistema biológico, compreendendo solo, vegetação e fauna (Equação 13). As operações realizadas na conversão das variáveis para o sistema CGS resultaram em valores de magnitude baixa para os locais estudados (Tabela 19), variando de 0,001, na floresta natural, a 0,03 na parcela 1 da Mina 2 (substrato washing plant). As parcelas localizadas na floresta natural tenderam a apresentar valores mais baixos, na magnitude de 10^{-3} , enquanto a maioria dos locais em recuperação valores na ordem de 10^{-2} .

$$Pi1 = \frac{V1 \times \sqrt{V19}}{\sqrt{V16} \times V17 \times \sqrt{V20}} \quad (13)$$

Onde,

- V_1 é o carbono da biomassa microbiana; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{17} a biomassa epígea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Correlações significativas (Tabela 20) foram obtidas apenas com a biomassa epígea (-0,89), estoque de carbono (-0,89) e DAP (-0,67). O carbono da biomassa microbiana e a riqueza de espécies por indivíduo arbóreo apresentaram correlações fracas e negativas (-0,33 e -0,22), enquanto a riqueza da macrofauna e regeneração natural arbórea valores inexpressivos (0,13 e 0,11).

Tabela 19 – Valores obtidos para os produtos adimensionais tomando os dados das parcelas em recuperação e ecossistema de referência Amazônico.

Amostras	Pi1	Pi2	Pi3	Pi4	Pi5	Pi6	Pi7	Pi8	Pi9	Pi10	Pi11	Pi12	Pi13
Parcela 1 -Mina 1	6.90E-03	2.44E+00	1.71E+01	6.10E-02	3.80E-03	2.33E-04	5.73E+00	1.73E+00	3.00E-02	1.00E-03	3.97E+05	5.40E-03	4.50E-01
Parcela 1 –Mina 2	3.11E-02	1.07E+00	7.57E+01	1.71E-01	1.00E-02	6.77E-04	3.14E+00	1.05E+00	1.00E-02	9.00E-04	5.76E+05	1.82E-02	4.50E-01
Parcela 1 -Mina 3	1.42E-02	1.19E+00	2.96E+01	8.61E-02	2.04E-02	4.34E-04	4.57E+00	9.50E-01	1.00E-02	5.00E-04	1.36E+06	1.57E-02	4.50E-01
Parcela 1 -Mina 4	2.44E-02	1.93E+00	3.73E+01	9.35E-02	5.60E-03	4.27E-04	7.78E+00	1.19E+00	5.00E-02	1.30E-03	4.22E+05	2.90E-03	4.50E-01
Parcela 1 -Mina 5	3.60E-03	3.14E+00	5.75E+00	2.24E-02	1.30E-03	8.53E-05	1.14E+01	2.23E+00	0.00E+00	1.20E-03	5.00E+05	3.40E-03	4.50E-01
Parcela 1 -Mina 6	1.71E-02	6.70E-01	3.37E+01	1.29E-01	4.20E-03	4.71E-04	1.10E+01	2.54E+00	4.00E-02	1.50E-03	4.35E+05	2.80E-03	4.50E-01
Parcela 2 -Mina 6	1.20E-02	7.00E-01	1.93E+01	5.48E-02	3.40E-03	2.17E-04	7.74E+00	2.59E+00	4.00E-02	1.70E-03	4.16E+05	3.30E-03	4.50E-01
Floresta Amazônica pouco perturbada	1.00E-03	1.31E+01	1.27E+00	4.70E-03	2.00E-04	1.62E-05	1.28E+01	3.26E+00	1.00E-02	1.90E-03	1.28E+06	2.06E-02	4.50E-01
Floresta Amazônica perturbada	5.70E-03	8.45E+00	6.70E+00	6.79E-02	1.00E-03	1.81E-04	6.68E+00	2.05E+00	2.00E-02	1.50E-03	9.95E+05	1.79E-02	4.50E-01

Embora não tenham apresentado correlações significativas, à respiração basal (0,39), celulase (-0,44), densidade do solo (0,48), altura média arbórea (0,5) e riqueza de espécies arbóreas por m² (-0,44) obtiveram valores moderados, sugerindo uma abrangente representatividade desse produto adimensional.

Em Pi2 a relação entre celulase e respiração basal (Equação 14) demonstrou que as parcelas naturais apresentaram valores mais elevados, com a parcela 1 da Mina 5 e parcela 1 da Mina 1, ambas localizadas em piso de lavra, atingindo valores mais próximos ao ecossistema de referência.

Apesar de considerar apenas duas variáveis em seu cálculo, Pi2 também se mostrou como um índice abrangente, atingindo correlações significativas com a respiração basal (-0,67), densidade do solo (-0,59), altura média arbórea (0,56), biomassa epígea (0,78) e estoque de carbono (0,78), além de correlações moderadas com a celulase (0,5), carbono da biomassa microbiana (0,39), DMG (0,44), DAP (0,5), regeneração natural arbórea (-0,39) e riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado (0,39).

$$Pi2 = \frac{V2}{V18} \quad (14)$$

Onde,

- V_2 é a atividade celulase e V_{18} a respiração basal do solo.

O terceiro produto adimensional (Pi3) relacionou o solo, a vegetação e fauna, porém, considerando uma propriedade física do solo (Equação 15). As áreas naturais assumiram os valores mais baixos, porém, permitindo a diferenciação da floresta perturbada da pouco perturbada.

$$Pi3 = \frac{V3 \times \sqrt{V19}}{\sqrt{V16} \times V17 \times \sqrt{V20}} \quad (15)$$

Onde,

- V_3 é densidade aparente do solo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{17} a biomassa epígea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Dentre os locais em recuperação, apenas a parcela 1 da Mina 5 (substrato piso de lavra) apresentou o valor da mesma ordem de grandeza que o ambiente de referência, sendo os valores das outras parcelas ao menos quatro vezes superiores.

A análise de correlação demonstrou que esse índice tem sua representatividade associada a biomassa florestal, com correlações significativas em relação à biomassa epígea (-0,83), estoque de carbono (-0,83) e DAP (-0,67).

Porém, algumas características do solo e da riqueza florestal também foram representadas, visto que correlações moderadas foram obtidas em relação à celulase (-0,44), respiração basal (0,39), densidade do solo (0,48) e riqueza de espécies arbóreas por m² (-0,44).

Uma vez que a densidade aparente do solo e a CTC possuem as mesmas dimensões básicas (massa/volume), em Pi4, as quatro variáveis do sistema biológico, foram combinadas com a CTC, resultando em um produto adimensional que condensou quatro variáveis biológicas e uma propriedade química do solo (Equação 16).

$$Pi4 = \frac{V4 \times \sqrt{V19}}{\sqrt{V16} \times V17 \times \sqrt{V20}} \quad (16)$$

Onde,

- V_4 é a Capacidade de Troca de Cátions do solo (CTC); V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{17} a biomassa epígea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

O ambiente de referência apresentou os menores valores, entretanto, Pi4 possibilitou a diferenciação da floresta amazônica pouco perturbada da perturbada. Esse índice ainda demonstrou que as parcelas 2 da Mina 6, a parcela 1 da Mina 5 e parcela 1 da Mina 1, todas localizadas sobre o substrato piso de lavra, assumiram valores na mesma ordem de grandeza que a floresta amazônica perturbada.

Em termos de correlações, a biomassa epígea (-0,72), estoque de carbono (-0,72) e DAP (-0,56) apresentaram maiores valores em relação a Pi4, enquanto que correlações moderadas foram obtidas para a densidade do solo (0,48) e altura média arbórea (-0,50).

No quinto produto adimensional (Pi5) a CTC foi substituída pela SB, outra variável de dimensão química (Equação 17). Diferentemente ao Pi4, Pi5 obteve correlação moderada a variável química utilizada em seu cálculo, demonstrando sensibilidade aos valores da SB dos locais avaliados.

$$Pi5 = \frac{V5 \times \sqrt{V19}}{\sqrt{V16} \times V17 \times \sqrt{V20}} \quad (17)$$

Onde,

- V_5 é a Soma de Bases do solo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{17} a biomassa epígea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Foram identificadas correlações moderadas com diversas das propriedades ambientais avaliadas. A densidade do solo (0,54) e a SB (0,44) foram às variáveis que apresentaram correlações positivas, sendo a celulase (-0,5), CBM (-0,50), DAP (-0,5), riqueza de espécies arbóreas por m² (-0,5), densidade de indivíduos arbóreos (-0,5), estoque de carbono e biomassa epígea (-0,56) negativamente correlacionadas.

Em Pi6 a SB foi substituída pela MOS (Equação 18), resultando em valores de baixa magnitude. Entretanto, sua correlação em relação a MOS foi fraca (-0,17), tendo esse produto adimensional sua representatividade atribuída principalmente à celulase (-0,5), CBM (-0,50), densidade do solo (0,65), altura média arbórea (-0,56), DAP (-0,50), estoque de carbono e biomassa epígea (-0,78).

$$Pi6 = \frac{V6 \times \sqrt{V19}}{\sqrt{V16} \times V17 \times \sqrt{V20}} \quad (18)$$

Onde,

- V_6 é a matéria orgânica do solo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{17} a biomassa epígea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Pi7, Pi8 e Pi9, representam produtos adimensionais derivados apenas do sistema biológico, incluindo variáveis da vegetação e fauna. Em Pi7, a altura média do dossel arbóreo foi integrada a regeneração natural florestal, riqueza da macrofauna e riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado (Equação 19). Nesse índice a floresta amazônica pouco perturbada assumiu valor mais elevado, enquanto a floresta perturbada apresentou valores similares às parcelas em recuperação.

$$Pi7 = \frac{V_7 \times \sqrt{V_{16}} \times \sqrt{V_{20}}}{\sqrt{V_{19}}} \quad (19)$$

Onde,

- V_7 é a Altura média do estrato arbóreo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbórea por indivíduo amostrado.

Pi7 teve sua representatividade associada à riqueza da macrofauna (-0,52) e riqueza de espécies arbórea por m² (0,56). Ainda, se observou a influência de algumas variáveis do solo, como a celulase (0,44), MBC (0,44) e SB (-0,39) nos valores obtidos nesse índice.

No oitavo produto adimensional a altura média arbórea foi substituída pelo DAP (Equação 20). Tendências semelhantes foram observadas em relação a Pi7. Porém, correlações mais elevadas foram obtidas em relação à densidade de indivíduos arbóreos (0,5) e riqueza da macrofauna (-0,65).

$$Pi8 = \frac{V_8 \times \sqrt{V_{16}} \times \sqrt{V_{20}}}{\sqrt{V_{19}}} \quad (20)$$

Onde,

- V_8 é o diâmetro da altura do peito do estrato arbóreo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbórea por indivíduo amostrado.

Em Pi8 a floresta amazônica pouco perturbada assumiu o valor máximo, seguida da floresta perturbada, que apresentou grandeza próxima aos locais em recuperação. Ainda, Pi8 manteve as mesmas tendências observadas em Pi7, com as parcelas 1 das Minas 5 e 6 e a parcela 2 da Mina 6, localizadas nos substratos piso de lavra e Rejeito seco, apresentando os valores mais próximos aos ambientes de referência.

Em Pi9 o DAP foi substituído pela altura da serapilheira (Equação 21), apresentando uma correlação significativa com essa variável (0,78), correlação moderada e positiva em relação à regeneração natural arbórea (0,39), além de correlações fracas e moderadas em relação ao estoque de carbono (-0,33), biomassa epígea (-0,33) e riqueza da macrofauna (-0,39).

$$Pi9 = \frac{V9 \times \sqrt{V16} \times \sqrt{V20}}{\sqrt{V19}} \quad (21)$$

Onde,

- V_9 é a altura da serrapilheira; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Os valores apresentaram grandeza na ordem de 10^{-3} . Porém, permitiram a diferenciação do ecossistema de referência perturbado do pouco perturbado. Os locais em recuperação e as áreas naturais apresentaram valores mais próximos em Pi9, com as parcelas das minas 2, 3 e 5 apresentando valores próximos à floresta levemente perturbada e a parcela 1 da Mina 1 valores similares à floresta perturbada.

O DMG do solo apresentou a mesma dimensão básica que o DAP, portanto, em Pi10 foi possível combiná-lo com a regeneração natural, riqueza da macrofauna e riqueza florestal por indivíduo amostrado (Equação 22).

$$Pi10 = \frac{V10 \times \sqrt{V16} \times \sqrt{V20}}{\sqrt{V19}} \quad (22)$$

Onde,

- V_{10} é o diâmetro médio geométrico dos agregados do solo; V_{16} a regeneração natural arbórea; V_{19} a riqueza de espécies da macrofauna e V_{20} a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado.

Tendências semelhantes a $Pi1$, $Pi6$ e $Pi9$ foram obtidas, resultando em valores de grandeza pequena. Porém, esse produto adimensional atingiu uma representatividade abrangente das condições ambientais, com correlações significativas em relação à riqueza da macrofauna (-0,72), CBM (-0,56) e SB (-0,6), além de correlações fracas e moderadas com o DMG (0,28), regeneração natural arbórea (0,33) e a densidade de indivíduos arbóreos (0,44).

Em $Pi11$, a informação relacionada à riqueza de espécies e à regeneração natural arbórea foi condensada (Equação 22). O valor obtido atingiu uma elevada magnitude, com correlações moderadas em relação à respiração basal (-0,39), altura média arbórea (-0,5), regeneração natural arbórea (-0,56) e a riqueza de espécies arbórea por indivíduo amostrado (0,67).

Esse índice permitiu a diferenciação entre os dois ambientes de referência, com apenas a parcela 1 da mina 3, há com maior idade de plantio, atingindo valor da mesma grandeza que os sistemas de referência.

$$Pi11 = \frac{V_{11}}{V_{16} \times V_{20}} \quad (23)$$

Onde,

- V_{11} é a riqueza de espécies arbóreas total; V_{16} a regeneração natural arbórea e V_{20} a riqueza arbórea por indivíduo amostrado.

O décimo segundo produto adimensional representou a razão entre a densidade de indivíduos arbóreos com a regeneração natural florestal (Equação 24). Apesar de sintetizar apenas duas variáveis também se observou uma boa representatividade do índice calculado, com correlações moderadas identificadas em relação à respiração basal do solo (-0,56), DMG (0,44), DAP (0,39), altura da serrapilheira (-0,44), densidade de indivíduos arbóreos (0,39), estoque de carbono (0,44), biomassa epígea (0,44), riqueza da macrofauna (0,46) e correlações

significativas com a regeneração natural arbórea (-0,72) e riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado (0,61).

$$Pi12 = \frac{V12}{V16} \quad (24)$$

Onde,

- V_{12} é a densidade arbórea e V_{16} a regeneração natural arbórea.

Apenas as parcelas das Minas 2 e 3 atingiram a mesma grandeza de valores obtida nos ambientes de referência, que por sua vez apresentam idades de plantio avançadas em relação aos demais locais em recuperação.

Por fim, no ultimo produto adimensional, como a biomassa epígea e o estoque de carbono apresentaram as mesmas dimensões básicas, sua combinação (Equação 25) resultou na constante utilizada para a conversão dos dois parâmetros (0.45).

$$Pi13 = \frac{V13}{V17} = 0.45 \quad (25)$$

Onde,

- V_{13} é o estoque de carbono e V_{17} a biomassa epígea.

Tabela 20 – Correlação de Kendall entre os indicadores ambientais e os índices adimensionais.

Variáveis	AC	RBS	CBM	CTC	SB	MOS	Ds	DMG	H	DAP	Hs	Rt	Da	EC	RNA	Be	Rma	Ri	Pi1	Pi2	Pi3	Pi4	Pi5	Pi6	Pi7	Pi8	Pi9	Pi10	Pi11	Pi12
AC	1																													
RBS	-0.17	1																												
CBM	0.33	-0.06	1																											
CTC	0	-0.39	0	1																										
SB	-0.17	0	-0.61	-0.06	1																									
MOS	-0.11	-0.28	0	0.78	0.06	1																								
Ds	-0.48	0.37	-0.59	-0.2	0.2	-0.2	1																							
DMG	0.28	-0.33	0.5	-0.17	-0.56	-0.39	-0.31	1																						
H	0.5	-0.22	0.39	-0.06	0	-0.06	-0.59	0.11	1																					
DAP	0.22	-0.5	0.22	0.33	-0.06	0.11	-0.25	0.39	0.28	1																				
Hs	-0.06	0.22	-0.06	-0.17	0.11	-0.06	0.14	-0.11	-0.11	-0.17	1																			
Rt	0.11	-0.17	0.44	0.44	-0.39	0.44	-0.42	-0.06	0.28	0.22	-0.28	1																		
Da	0.11	-0.17	0.33	0.22	-0.61	0	-0.03	0.5	-0.17	0.44	-0.39	0.33	1																	
EC	0.5	-0.56	0.28	0.28	0	0.17	-0.48	0.22	0.56	0.61	-0.33	0.39	0.28	1																
RNA	0.11	0.5	-0.11	0.11	-0.06	0	0.08	-0.39	-0.17	-0.22	0.28	0.11	-0.11	-0.28	1															
Be	0.5	-0.56	0.28	0.28	0	0.17	-0.48	0.22	0.56	0.61	-0.33	0.39	0.28	1	-0.28	1														
Rma	-0.13	-0.39	-0.39	-0.13	0.39	-0.07	0.17	0.07	0.07	0.07	-0.13	-0.46	-0.2	0.07	-0.65	0.07	1													
Ri	-0.11	-0.61	0.11	0.33	-0.28	0.33	-0.08	0.28	0.06	0.33	-0.39	0.33	0.44	0.28	-0.56	0.28	0.26	1												
Pi1	-0.44	0.39	-0.33	-0.33	0.17	-0.22	0.48	-0.17	-0.5	-0.67	0.28	-0.44	-0.33	-0.83	0.11	-0.83	0.13	-0.22	1											
Pi2	0.5	-0.67	0.39	0.17	-0.22	0.06	-0.59	0.44	0.56	0.5	-0.22	0.28	0.28	0.78	-0.39	0.78	0.13	0.39	-0.61	1										
Pi3	-0.44	0.39	-0.33	-0.33	0.17	-0.22	0.48	-0.17	-0.5	-0.67	0.28	-0.44	-0.33	-0.83	0.11	-0.83	0.13	-0.22	1	-0.61	1									
Pi4	-0.33	0.28	-0.33	-0.11	0.06	0	0.48	-0.17	-0.5	-0.56	0.17	-0.33	-0.22	-0.72	0	-0.72	0.13	0	0.78	-0.5	0.78	1								
Pi5	-0.5	0.22	-0.5	-0.28	0.44	-0.17	0.54	-0.33	-0.33	-0.5	0.22	-0.5	-0.5	-0.56	-0.06	-0.56	0.33	-0.06	0.72	-0.56	0.72	0.61	1							
Pi6	-0.5	0.33	-0.5	-0.17	0.22	-0.06	0.65	-0.33	-0.56	-0.5	0.22	-0.39	-0.28	-0.78	0.06	-0.78	0.2	-0.06	0.83	-0.67	0.83	0.83	0.78	1						
Pi7	0.44	-0.06	0.44	0.11	-0.39	0	-0.37	0.06	0.39	0.11	-0.06	0.56	0.11	0.28	0.33	0.28	-0.52	0	-0.44	0.28	-0.44	-0.44	-0.5	-0.5	1					
Pi8	0.28	0.11	0.39	0.17	-0.44	0.06	-0.2	0.11	0.11	0.28	-0.11	0.5	0.5	0.33	0.39	0.33	-0.65	-0.06	-0.5	0.22	-0.5	-0.5	-0.67	-0.56	0.61	1				
Pi9	-0.06	0.22	0.17	-0.06	-0.11	-0.06	0.03	0	-0.11	-0.17	0.78	-0.06	-0.17	-0.33	0.39	-0.33	-0.39	-0.28	0.28	-0.22	0.28	0.06	0.11	0.11	0.17	0.11	1			
Pi10	0.22	0.17	0.56	0.11	-0.61	0	-0.25	0.28	0.06	0.22	0.06	0.56	0.44	0.17	0.33	0.17	-0.72	-0.11	-0.33	0.17	-0.33	-0.33	-0.61	-0.39	0.56	0.83	0.28	1		
Pi11	-0.11	-0.39	0.22	0	-0.28	0.11	-0.2	0.28	0.17	0.11	-0.5	0.33	0.33	0.17	-0.56	0.17	0.26	0.67	-0.11	0.28	-0.11	0	-0.06	-0.06	0.11	-0.17	-0.39	-0.11	1	
Pi12	0.06	-0.56	0.06	0.06	0	0.06	-0.14	0.44	0.11	0.39	-0.44	0.06	0.39	0.44	-0.72	0.44	0.46	0.61	-0.28	0.44	-0.28	-0.17	-0.22	-0.22	-0.28	-0.11	-0.44	-0.17	0.39	1

Onde, AC representa a atividade celulase, RBS a respiração basal do solo, CTC a capacidade de troca de cátions, SB a soma de bases, MOS o matéria orgânica do solo, Ds a densidade aparente do solo, DMG o diâmetro médio geométrico dos agregados do solo, H a altura média do dossel arbóreo, DAP o diâmetro da altura do peito do dossel arbóreo, Hs a altura da serapilheira, Rt a riqueza total de espécies arbóreas, Da a densidade de indivíduos arbóreos, EC o estoque de carbono, RNA a regeneração natural arbórea, Be a biomassa epígea, Rma a riqueza de espécies da macrofauna e Ri a riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado . Os valores em negrito possuem correlações diferentes de zero a 5% de significância ($\alpha=0,05$).

6.3.2 Análise de componentes principais

A análise componente principais revelou que quatro componentes detêm cerca de 70% da variabilidade total das unidades amostrais (Tabela 21). Na primeira (PC1), que deteve cerca de 40% da variabilidade total, valores expressivos foram identificados nas cargas fatoriais da celulase (0,5), DAP (0,72), biomassa epígea (0,86), estoque de carbono (0,86), Pi1 (-0,87), Pi2 (0,57) Pi3 (-0,87), Pi4 (-0,84), Pi5 (-0,64) e Pi6 (-0,85).

Tais valores denotam que essas variáveis e índices adimensionais apresentam maior poder explicativo (Legendre e Legendre, 2012; Hair Jr. et al., 2010) e como os produtos adimensionais Pi1, Pi3, Pi4, Pi5 e Pi6 apresentaram valores mais elevados para os locais com menor DAP, celulase e biomassa epígea, suas cargas fatoriais foram negativas, de maneira similar as correlações.

Embora a altura média do dossel arbóreo tenha apresentado uma carga fatorial mais baixa (0,42) esse valor ainda é considerado por Hair Jr. et al. (2010) como condizente a inferência sobre seu poder explanatório na análise de componentes principais.

Ainda, há um indicativo de que os produtos adimensionais apresentam um elevado grau de representatividade dessas diferenças, visto que cargas fatoriais superiores a 0,8 foram identificadas em Pi1, Pi3, Pi4 e Pi6, atingindo mesmo poder explicativo em relação à biomassa epígea e o estoque de carbono.

A segunda componente principal (PC2) reteve cerca de 20% da variabilidade total, com as cargas fatoriais mais elevadas associadas à respiração basal do solo (-0,69), DMG (0,54), regeneração natural arbórea (-0,80), riqueza da macrofauna (0,68), riqueza de espécies arbóreas por indivíduo arbóreo (0,58), Pi8 (-0,55) e Pi12 (0,65). Esses resultados sugerem uma maior influência da regeneração natural nas diferenças concentradas pela PC2. Porém, com participação da respiração basal, DMG e da riqueza nas diferenças existentes nos dados.

Tabela 21 – Resultados da análise de componentes principais para os dados obtidos nos locais em recuperação considerando os indicadores ambientais e índices adimensionais.

Componentes Principais com Autovalor >1				
	PC1	PC2	PC3	PC4
Autovalor	10.23	5.10	2.94	2.55
Variabilidade retida (%)	38.91	19.41	11.20	9.68
Variabilidade acumulada (%)	38.91	58.32	69.53	79.21
Variáveis	Cargas fatoriais			
Celulase	0.52	-0.06	0.02	-0.24
Respiração Basal	-0.32	-0.70	0.03	-0.35
Carbono da Biomassa Microbiana	0.07	0.04	0.60	-0.04
Capacidade de Troca de Cátions	0.18	0.02	-0.03	0.87
Soma de Bases	0.18	0.03	-0.90	0.00
Matéria orgânica no solo	-0.03	0.02	-0.17	0.93
Densidade aparente do solo	-0.31	-0.12	-0.07	-0.13
Diâmetro médio geométrico	0.15	0.54	0.69	-0.39
Altura média do dossel arbóreo	0.42	0.06	-0.23	-0.13
Diâmetro da altura do peito do dossel arbóreo	0.73	0.31	0.16	0.14
Altura da serrapilheira	-0.10	0.07	-0.06	0.02
Riqueza total do dossel arbóreo	0.07	-0.29	0.31	0.55
Densidade arbórea	0.20	0.08	0.77	0.04
Estoque de Carbono	0.86	0.17	-0.11	0.09
Regeneração natural arbórea	0.01	-0.80	-0.02	0.09
Biomassa epígea	0.86	0.17	-0.11	0.09
Riqueza da macrofauna	-0.01	0.69	-0.44	-0.16
Riqueza de espécies arbóreas por indivíduo amostrado	-0.12	0.58	0.31	0.43
Pi1	-0.87	0.06	-0.01	-0.15
Pi2	0.58	0.43	0.12	0.02
Pi3	-0.87	0.06	-0.01	-0.15
Pi4	-0.85	0.12	0.02	0.06
Pi5	-0.64	0.16	-0.39	-0.07
Pi6	-0.82	0.06	-0.11	0.04
Pi7	0.22	-0.45	0.26	0.09
Pi8	0.47	-0.56	0.49	0.05
Pi9	-0.19	-0.04	0.23	0.11
Pi10	0.22	-0.44	0.69	0.05
Pi11	-0.32	0.38	0.28	0.13
Pi12	0.27	0.66	0.14	-0.03

*Valores em negrito denotam cargas fatoriais e respectivos valores de variabilidade retida significativos para o tamanho amostral empregado, de acordo com Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,55$). Valores em itálico denotam cargas fatoriais e respectivos valores de variabilidade retida superiores ao valor mínimo estabelecido por Hair Jr. et al. (2010) ($\pm 0,3$) para análise da componente principal.

Ainda, embora tenham apresentado valores inferiores nas cargas fatoriais obtidas na PC2, Pi2 (0,43), Pi7 (-0,45) e Pi10 (-0,44) também podem ser considerados como variáveis explicativas. Como os sinais das cargas fatoriais dos produtos adimensionais apresentaram diferenças, Pi7, Pi8 e Pi10 tem seu poder explicativo direcionado positivamente à respiração basal do solo e regeneração natural, enquanto Pi2 e Pi12 ao DMG e a riqueza por indivíduo arbóreo.

A terceira componente principal (PC3) reteve aproximadamente 11% da variabilidade total, com cargas fatoriais mais elevadas no CBM (0,6), SB (-0,89), DMG (0,69), densidade de indivíduos arbóreos (0,77) e riqueza da macrofauna (-0,44). Apenas os produtos adimensionais Pi10 (0,69) e Pi8 (0,49) atingiram cargas fatoriais para serem considerados com algum poder explicativo na PC3.

A quarta componente principal (PC4) reteve 10% da variabilidade, associada a MOS, CTC e riqueza florestal, com os produtos adimensionais não atingindo valores superiores a $\pm 0,4$ nas cargas fatoriais.

6.4 Discussão

Para a sintetização da informação nos produtos adimensionais, um maior número de variáveis possível foi empregado, compreendendo o máximo de sistemas ambientais disponíveis. Porém, foi necessário comprometer o número de amostras, uma vez que os estudos que geraram os dados não apresentaram delineamentos experimentais similares.

A utilização de tamanhos amostrais reduzidos resulta em um maior risco na inferência dos resultados da ACP, associada a sua instabilidade com um aumento do espaço amostral (Jung e Marron, 2009). O número ideal de amostras (>100) deveria considerar um mínimo de 20 amostras para cada variável (Hair Jr. et al, 2010).

Entretanto, os resultados obtidos mostraram-se em concordância com pesquisa preliminar conduzida nos capítulos 4 e 5 e de estudos realizados por outros autores no mesmo local (Ribeiro et al, 2016; Ribeiro et al., 2015; Yada, et al., 2015; Mello, 2015; Longo et al., 2011; Longo et al, 2011a; Ribeiro et al, 2006; Longo et al., 2005; Ribeiro et al, 2004). Os produtos adimensionais se mostraram capazes em representar as diferenças observadas no nível de qualidade ambiental dos diferentes substratos minerados, com as áreas localizadas em Piso de Lavra assumindo valores mais próximos das áreas não mineradas.

Porém, apesar de sintetizarem a informação dos diferentes componentes do meio considerados, a grandeza dimensional das variáveis utilizadas e a magnitude de diferenças entre os locais estudados influenciaram nos resultados obtidos nos produtos adimensionais. As variáveis fitossociológicas se mostraram dominantes nos índices estudados, com os indicadores do solo apresentando uma menor influência.

As correlações e a Análise de Componentes Principais demonstraram que, apesar de serem formadas por variáveis de solo, vegetação e fauna, Pi1, P3, P4, Pi5 e Pi6 foram principalmente representativos a biomassa florestal. Esses produtos adimensionais apresentaram valores elevados nas cargas fatoriais na primeira componente principal (PC1), que reteve uma maior porção da variabilidade existente nas parcelas avaliadas, indicando um alto grau de redundância entre si e com as variáveis de maior carga fatorial na PC1.

Apesar de não ter sido formado por variáveis de desenvolvimento florestal, Pi2 também apresentou uma alta carga fatorial na PC1. Porém, esse produto adimensional foi formado pela razão de duas variáveis bioquímicas do solo, que indicam o ciclo de nutrientes e a grau de atividade microbológica. Como Pi2 também apresentou uma carga fatorial expressiva na PC2, que por sua vez demonstrou associação com o DMG, a regeneração natural florestal, a riqueza florestal e macrofauna, além de correlações moderadas com diversas variáveis de diferentes componentes do meio, se destaca seu potencial na representação de diversos aspectos ecossistêmicos.

Pi7, Pi8 e Pi9 condensaram apenas a informação do sistema biológico, com apenas Pi7 e Pi8 apresentando valor expressivo para as cargas fatoriais da PC2. Esses produtos adimensionais foram principalmente impulsionados por suas variáveis originadoras. Porém, Pi8 obteve resultados expressivos na representação da condição ambiental dos locais minerados.

Considerando-se a capacidade de síntese das informações de diferentes componentes do meio, o Pi10 obteve resultados satisfatórios dentre os índices adimensionais calculados. Esse índice integrou uma medida de agregação de solo, a regeneração natural florestal, a riqueza florestal e da macrofauna, sendo também significativamente correlacionado com a CBM e SB. Portanto, pode fornecer uma representação sistêmica na avaliação do processo de recuperação, uma vez que Pi10 também apresentou cargas fatoriais expressivas na PC2 e na PC3, além de possibilitar a complementação da informação obtida nas variáveis e índices adimensionais da PC1.

Pi11 e Pi12 resumiram apenas informações sobre variáveis florestais, sendo altamente influenciados pela regeneração natural e a riqueza de espécies. Entretanto, apenas Pi12 apresentou carga fatorial expressiva na PC2, indicando um uma maior representatividade desse índice. P13 apenas expressou a constante

utilizada para converter a biomassa da floresta em estoque de carbono, sendo possível a substituição, em todos os produtos adimensionais, da biomassa epígea pelo estoque de carbono tomando a constante como fator de conversão.

Assim, considerando a aplicabilidade dos produtos adimensionais, a utilização de diferentes combinações se mostra como uma opção válida, principalmente para fins de classificação e análise de diferenças em relação a ecossistemas de referência. Dependendo da importância das variáveis para o caso em estudo, há a possibilidade, por exemplo, da utilização de $Pi1$, $Pi3$, $Pi4$, $Pi5$ ou $Pi6$ para destacar as diferenças entre na biomassa florestal. No entanto, se a atividade microbiana desempenha um papel chave, $Pi2$ representa uma melhor opção, se a densidade do solo, $Pi3$.

Se houver interesse em alguma propriedade química do solo e no desenvolvimento da biomassa florestal $Pi4$, $Pi5$ ou $Pi6$ poderiam ser empregados. Caso a representação do sistema biológico seja algo de destaque, $Pi7$, $Pi8$ e $Pi9$ mostraram-se adequados, com $Pi7$ direcionado a riqueza florestal, $Pi8$ a riqueza da macrofauna e $Pi9$ a altura de serapilheira.

Ainda, caso haja interesse em apenas avaliar o desenvolvimento florestal $Pi11$ e $Pi12$ se mostraram aplicáveis. Para obtenção de índices de representatividade sistêmica, $Pi2$ e(ou) $Pi10$ mostram potencial, sendo, ainda, possível a combinação de diferentes produtos adimensionais, com ressalvas a observação da sua ambiguidade e representatividade.

Porém ressalta-se que esses produtos foram obtidos após diversas seleções de um subespaço da matriz dimensional para resolução da Equação 12, uma etapa crítica e crucial desse tipo de análise. Resultados diferenciados podem ser obtidos com a seleção de outros subespaços, com a obtenção de outros produtos adimensionais.

Além disso, há a possibilidade de alteração dos índices obtidos, substituindo a variável utilizada por outra com as mesmas dimensões, resultando em produtos que expressam outras propriedades do meio, conforme observado em $Pi13$. Entretanto, destaca-se a importância de utilização de variáveis representativas do fenômeno e atenção a grandeza dimensional da variável escolhida.

6.5 Conclusões

A análise dimensional se mostrou como uma proposta integradora bem sucedida na construção de índices voltados a avaliação das condições ambientais de locais minerados e sua comparação com o ecossistema de referência.

Os cálculos envolvidos se mostraram simples, e esse documento consolida um roteiro metodológico de como conduzir a análise e avaliar os resultados obtidos em malhas amostrais reduzidas. Porém, há a recomendação da utilização de delineamentos que consideram uma maior malha amostral. Inclusive, para emprego métodos mais sofisticados de análise do desempenho dos índices calculados, como a Análise Discriminante de Fisher ou outros algoritmos de classificação, supervisionados e não supervisionados, através de rede neurais artificiais, e outros.

Em geral os produtos adimensionais foram capazes de representar as diferenças entre os locais em recuperação e o ecossistema de referência, com maior similaridade dos locais em substrato piso de lava. Porém, alguns índices se destacaram para fins de avaliação sistêmica do processo de recuperação ambiental. A relação entre a respiração basal do solo e atividade celulase (Pi2) se mostrou representativa na descrição das duas componentes principais que apresentaram maior poder explicativo da variabilidade total entre as amostras estudadas. Já Pi8 demonstrou potencial para a avaliação integrada das condições biológicas acima da superfície, envolvendo desde o volume florestal até atributos de riqueza da flora e da fauna. Os resultados obtidos para o índice Pi10 demonstraram seu potencial para avaliação abrangente do processo de recuperação, com representação do solo, da fauna e da flora.

Estudos futuros podem explorar o potencial dos índices citados na avaliação de outras condições ecossistêmicas, além de testar sua análise combinada para fins de tipificação e avaliação do processo de recuperação ambiental de áreas degradadas pela mineração.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Análise Dimensional representa uma proposta viável para obtenção de índices integradores e representativos do processo de recuperação ambiental. Destaca-se que a importância dos aspectos metodológicos empregados no processo de conhecimento por descoberta aplicado ao banco de dados das áreas em recuperação na Floresta Nacional do Jamari no desenvolvimento do conhecimento contido nesse documento.

Os resultados dos capítulos 4, 5 e 6 demonstram grande potencial para fins práticos de avaliação e desenvolvimento no campo da restauração florestal, restauração ecológica, recuperação de áreas degradadas e de outros temas relacionados. O agrupamento hierárquico com estimativa de incerteza se demonstrou como uma abordagem promissora para identificação de estratégias de melhoria dos resultados da restauração florestal em comparação com o ecossistema de referência, permitindo a identificação de resultados florísticos diferenciados nas condições ambientais dos substratos avaliados.

No capítulo 4 a análise das propriedades dos substratos minerados possibilitou identificar a dinâmica do processo de recuperação do solo, fornecendo subsídios para compreensão da sua importância no contexto da recuperação ambiental. A matéria orgânica do solo nos horizontes superficiais desempenhou um papel fundamental, destacando a importância das ações iniciais de preparo do solo preliminarmente a revegetação. Ainda, as variáveis relacionadas à atividade microbiana dos solos minerados revelaram sua instabilidade frente a variações ambientais naturais em relação ao ecossistema de referência.

Três índices adimensionais se destacaram para fins de avaliação sistêmica do processo de recuperação ambiental (Pi2, Pi8 e Pi10), representando, de forma abrangente, as diferenças existentes entre os locais em recuperação e o ecossistema de referência. Destaca-se seu potencial para o desenvolvimento de padrões de qualidade e avaliação da recuperação de áreas degradadas pela mineração em estudos futuros.

8 REFERÊNCIAS

- Albiero, D. Avaliação do preparo de solo empregando o sistema de cultivo conservacionista em faixas com “Paraplow” rotativo usando análise dimensional. 2006. 292f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Almeida, R. O. P. O.; Sánchez, L. E. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Rev. Árvore [online]**. v. 29, n. 1, p. 47-54, 2004.
- Araújo, G. H. S.; Almeida, J. R.; Guerra, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 4 ed., Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. 281 p.
- Aynekulu, E.; Aerts, R. Denich, M.; Negussie, A.; Friis, I.; Demissew, S.; Boehmer, H. J., 2016. Plant diversity and regeneration in a disturbed isolated dry Afromontane forest in northern Ethiopia. **Folia Geobot**, 51, 115-127.
- Ayres, M.; Ayres Jr., M.; Ayres, D.L.; Santos, A. A., 2007. 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.
- Barret, S. W., 1980. Conservation in amazônia. **Biological Conservation**. 18, 209-235.
- Behera, B. C., Sethi, B. K., Mishra, R. R., Dutta, S. K., Thatoi, H. N., 2016. Microbial cellulases – Diversity & biotechnology with reference to mangrove environment: A review. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2016.12.001>
- Beurlen, H.; Cassedanne, J. P., 1981. The Brazilian Mineral Resources. **Earth Scientific Reviews**. 17, 177-206.
- Blonska, E., Lasota, J., Zwydak, M., Klamerus-Iwan, A., Golab, J., 2016. Restoration of forest soil and vegetation 15 years after landslides in a lower zone of mountains in temperate climates. **Ecological Engineering**, 97, 503-515.
- Bolfe, E. L. Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa de biomassa e de carbono em sistemas agroflorestais por meio de imagens orbitais. 2010. 319f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto De Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Bolton Jr, H., Elliot, L.F., Papendick, R.I., Berdick, D.F., 1985. Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effects of fertilization and cropping practices. **Soil Biology & Biochemistry**, 14, 423-427.
- Bradshaw, A., 1997. Restoration of mined lands—using natural processes. **Ecological Engineering**. 8, 255-269.

Bradshaw, A., 2000. The use of natural processes in reclamation – advantages and difficulties. **Landscape and urban planning**. 51, 89-100.

Bradshaw, A.D., 1984. Ecological principles and land reclamation practice. **Landscape Planning**. 11, 35-48.

Carmeis filho, A. C.A., Penn, C. J., Crusciol, C. A. C., Calonego, J. C., 2017. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 241, 11-23.

Costa, N. L., Townsend, C. R., Magalhães, J. A., Paulino, V. T., Pereira, R. G. A., Mochiutti, S., 2006. Recuperation and renovation of degraded pastures. **Revista Electrónica de Veterinaria**, 3 (1), 9-49.

Daw, M. S. **Introduction to Dimensional Analysis**. 1.ed. Clemson University: Murray S. Daw, 2008. 26f.

Delarmelinda, E. A., Souza Júnior, V. S., Wadt, P. G. S., Deng, Y., Campos, M. C. C., Câmara, E. R. G., 2017. Soil-landscape relationship in a chronosequence of the middle Madeira River in southwestern Amazon, Brazil. *Catena*, 149, 199-208.

Dzeroski, S. Data Mining. In: Jorgensen, S. E., Editor. **Encyclopedia of Ecology**: 821-830. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2008.

Ebeling, A. G., dos Anjos, L. H. C., Perez, D. L., Pereira, M. G., Valladares, G. S., 2008. Relationship between acidity and other chemical attributes of soils with high organic matter content. **Bragantia**, 67 (2), 429-439.

Elaalem, M., 2013. A Comparison of Parametric and Fuzzy Multi-Criteria Methods for Evaluating Land Suitability for Olive in Jeffara Plain of Libya. *Procedia APCBEE*. 5, 405-409.

Faquin, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2001. 182p.

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G. Smyth, P. 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. **AI Magazine**. 17, 37-54

Feelders, A.; Daniels, H.; Holsheimer, M., 2000. Methodological and practical aspects of data mining. **Information & Management**. 37, 271-281.

Feng, L.; Zhu, X.; Sun, X., 2014. Assessing coastal reclamation suitability based on a fuzzy-AHP comprehensive evaluation framework: A case study of Lianyungang, China. **Marine Pollution Bulletin**. 89, 102-111.

Fereidooni, M., Raiesi, F., Fallah, S. F., 2013. Ecological restoration of soil respiration, microbial biomass and enzyme activities through broiler litter application in a calcareous soil cropped with silage maize. **Ecological Engineering**, 58, 266-277.

Frawley, W. J.; Piatetsky-Shapiro, G.; Matheus, C. J., 1992. Knowledge Discovery in Databases: An Overview. **AI Magazine**. 13, 57-70.

Goldstein, M.; Smith, R. S., 1975. Land Reclamation Requirements and Their Estimated Effects on the Coal Industry. **Journal of Environmental Economics and Management**. 2, 135-149.

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, n. 15, p. 111-127, 2013.

Hair J.F., Anderson R.E., Tatham R.L. *Multivariate data analysis with readings*. 2nd ed. New York: Macmillan Publishing Company; 1987. p. 449.

Hair Jr., J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E. *Multivariate data analysis*. 10th ed. New York: Pearson, 2010, p. 761

Halme, P., Allen, K.A., Auniš, A. Bradshaw, R.H.W., Brūmelis, G., Čada, V., Clear, J.L., Eriksson, A.M., Hannon, G., Hyvärinen, E., Ikauniece, S., Iršėnaitė, R., Jonsson, B.G., Junninen, K., Kareksela, S., Komonen, A., Kotiaho, J.S., Kouki, J., Kuuluvainen, T., Mazziotta, A., Mönkkönen, M., Nyholm, K., Oldén, A., Shorohova, E., Strange, N., Toivanen, T., Vanha-Majamaa, I., Wallenius, T., Ylisirniö, A.L., Zin, E., 2013. Challenges of ecological restoration: Lessons from forests in northern Europe. **Biological Conservation**. 167, 248-256.

Harrell Jr, F. E., Dupont, C. (2016). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4.0-2. <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>

Higuchi, N.; Santos, J.; Ribeiro, R.J.; Minette, L.; Biot, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação de floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, v.28,n.2, p.153-165. 1998.

Huang, L., Zhang, P., Hu, Y., Zhao, Y., 2016. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. **Ecological Engineering**. 94, 638-646.

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. **Censo 2010**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=1&idnoticia=2036&t=ibge-parceria-marinha-brasil-lanca-atlas-geografico-zonas-costeiras-oceanicas&view=noticia>> Acesso em: 29/01/2018.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015. **Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres**.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2012. **Information and Analysis an the Brazilian Mineral Economy**. Instituto Brasileiro de Mineração: 7 ed. 68f.

Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2013. **The mining sector in Brazil: building institutions for sustainable development**. Instituto Brasileiro de Mineração: Report. 116f.

Jongman, R. H. G. ,TerBraak, C. J. F., van Tongeren, O. F. R., 1995. **Data Analysis in Community and Landscape Ecology**. Cambridge University Press, New York.

Jiménez-Muñoz, J.C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J.A., van der Schrier, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Sci. Rep.** 6, 33130.

Jung, S., & Marron, J. S. (2009). PCA consistency in High Dimension, Low Sample Size context. **Annals of Statistics**, 37(6 B), 4104-4130.

Kaiser, H. F., 1974. Little Jiffy, Mark IV. **Educational and Psychology Measurement**, 34, 111-117.

Kassambara, A. [aut, cre], Mundt, F. [aut]. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package version 1.0.4. 2017.

Knowles, H., Parrotta, J.A., 1995. Amazonian forest restoration: an innovative system for native species selection based on phonological data and field performance indices. **Commonwealth Forestry Review**. 74, 231-243.

Langhaar, H. L. 1951. **Dimensional analysis and theory of models**. Wiley, New York. 166 p.

Lausch, A.; Schmidt, A.; Tischendorf, L., 2015. Data mining and linked open data – New perspectives for data analysis in environmental research. **Ecological Modeling**. 295, 5-17.

Le, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, 25 (1), 1-18.

Legendre, P.; Legendre, L. Dimensional analysis in ecology. In: Legendre, P.; Legendre, L. **Developments in Environmental Modelling**. Inglaterra: Elsevier, 2012. p.109-142.

Lei, H.; Peng, Z.; Yiang, H.; Yang, Z., 2016 Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mine. **Ecological Engineering**. 94, 638-646.

Leinfelder, R.R., Iramina, W.S., Eston, S.M., 2015. Mining as a tool for reclamation of a Degraded Area. **Rev. Esc. Minas**. 68, 215-220.

Lewis, S.L., Brando, P.M. Phillips, O.L., van der Heijden, G.M.F., Nepstad, D., 2011. The 2010 Amazon drought. **Science**. 331, 554.

Li, X. R.; He, M. Z.; Duan, Z. H.; Xiao, H. L.; Jia, X. H., 2007. Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China. **Geomorphology**. 88, 254-265.

Lima, A.T., Mitchell, K., O'Connell, D.W., Verhoeven, J., Cappellen, P.V., 2016. The legacy of surface mining: Remediation, restoration, reclamation and rehabilitation. **Environmental Science & Policy**. 66, 227-233.

Lisboa, F.J.G., Chaer, G.M., Jesus, E.C., Faria, S.M., Gonçalves, F.S., Santos, F.M., Castilho, A.F., Berbara, L.L., 2012. The influence of litter quality on the relationship between vegetation and below-ground compartments: a Procrustean approach. **PlantSoil**. 367, 551-562.

Lloyd, B.; Wheeler, E., 1977. Brazil's Mineral Development: Potential and problems. **Resources Policy**. 3, 39-59.

Longo, R. M.; Ribeiro, A. I.; Melo, W. J., 2005. Physical and chemical characterization of the substratum of degraded areas by tin mining. **Bragantia** [online], 64 (1), 101-107.

Longo, R. M.; Ribeiro, A. I.; Melo, W. J., 2011. Use of green fertilizing in the recovery of soils degraded by mining in the amazon forest. **Bragantia**. 70 (1), 139-146.

Longo, R. M.; Ribeiro, A. I.; Melo, W. J., 2011a. Recovery of degraded soils in the tin mineral exploitation: microbial biomass and dehydrogenase activity. **Bragantia** [online], 70 (1), 132-138.

Luna, L., Miralles, I., Andrenelli, M. C., Gispert, M., Pellegrine, S., Vignozzi, N., Solé-Benet, A., 2016. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region. **CATENA**, 143, 256-264.

Ma, H.; Yuan, L. V.; Li, H., 2013. Complexity of ecological restoration in China. **Ecological Engineering**. 52, 75-78.

Machado, I. F., Figuerôa, S. F. M., 2001. 500 years of mining in Brazil: a brief review. **Resources Policy**, 27, 9-24.

Macagno, O. E. Historico-critical reviews of dimensional analysis. **Journal of the Franklin Institute**, v. 292, n. 6, p. 391-402, 1971.

Malavolta, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

Martinez-Alier, J., 2001. Mining conflicts, environmental justice, and valuation. **Journal of Hazard Materials**. 86, 153-170.

Martins, R. A. A busca da ciência a priori no final do século XVIII e a origem da análise dimensional. In: Martins, R. A.; Martins, L. A. C. P.; Silva, C. C.; Ferreira, J. M. H. **Filosofia e história da ciência no Cone Sul**: Campinas, 2004. p. 391-402.

Mazurak, A.P., 1950. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. **Soil Sci.**, 69:135-148.

Mello, G. F., Áreas degradadas pela exploração de cassiterita: Avaliação das condições dos agregados e atividades biológicas. [dissertação]. Sorocaba (SP): Pós-Graduação em Ciências Ambientais, UNESP – Universidade Estadual Paulista; 2015.

Meteorological Database for Teaching and Research - Brazilian Institute of Meteorology (BDMEP/INMET). Precipitation, Maximum temperatures and nebulosity data from 01 jan 2011 to 01 jan 2015 of Ariquemes-A940 station (Cod.: OMM 81970, Lat: -9.949001° and Long: -62.961873°). Available at <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>, accessed on: Jul. 11, 2017.

Miao, Z., Marrs, R., 2000. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. **Journal of Environmental Management**. 59, 205-215.

Monteiro, M. A., 2005. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. **Estudos Avançados**, 19 (53), 187-207.

Moreira A., Malavolta, E., 2004. Dynamic of organic matter and microbial biomass in a soil under different management systems in the Western Amazon. **Pesq. agropec. bras**, 39 (11), 1103-1110.

Mukhopadhyay, S., Maiti, S.K., Masto, R.E., 2013. Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. **Ecological Engineering**. 54, 133-142.

Mukhopadhyay, S., Maiti, S.K., Masto, R.E., 2014. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. **Ecological Engineering**. 71, 10-20.

Mukhopadhyay, S., Masto, R.E., Yadav, A., George, J., Ram, L.C., Shukla, S.P., 2016. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. **Science of The Total Environment**. 542, 540-550.

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

Parrotta, J.A., Knowles, O.H., Wunderle Jr., J. M., 1997. Development of floristic diversity in 10-year-old restoration forests on a bauxite mined site in Amazonia. **Forest Ecology and Management**. 99, 21-42.

Pascual, J. A., Garcia, C., Hernandez, T., Moreno, J. L., Ros, M., 2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. **Soil Biology & Biochemistry**, 32, 1877-1883.

Pedlowski M. A.; Dale V. H.; Matricardi, E. A. T.; Silva Filho, E. P., 1997. Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brazil. **Landscape and urban planning**. 38, 149-157.

Phillips, O.L., van der Heijden, G., Lewis, S.L., López-González, G., Aragão, L.E.O.C., Lloyd, J., Malhi, Y., Monteagudo, A., Almeida, S., Dávila, E.A., Amaral, I., Andelman, S., Andrade, A., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Blanc, L., Bonal, D., de Oliveira, Á.C.A., Chao, K.-J., Cardozo, N.D., da Costa, L., Feldpausch, T.R., Fisher, J.B., Fyllas, N.M., Freitas, M.A., Galbraith, D., Gloor, E., Higuchi, N., Honorio, E., Jiménez, E., Keeling, H., Killeen, T.J., Lovett, J.C., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Vargas, P.N., Patiño, S., Peh, K.S.H., Cruz, A.P., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez, H., Rudas, A., Salamão, R., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Ferry Slik, J.W., Sonké, B., Thomas, A.S., Stropp, J., Taplin, J.R.D., Vásquez, R., Vilanova, E., 2010. Drought–mortality relationships for tropical forests. **New Phytol.** 187, 631–646.

Phillips, O.L., Aragão, L.E.O.C., Lewis, S.L., Fisher, J.B., Lloyd, J., López-González, G. Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., Quesada, C.A., van der Heijden, G., Almeida, S., Amaral, I., Arroyo, L., Aymard, G., Baker, T.R., Bánki, O., Blanc, L., Bonal, D., Brando, P., Chave, J., Alves de Oliveira, Á.C., Dávila Cardozo, N., Czimczik, C.I., Feldpausch, T.R., Freitas, M.A., Gloor, E., Higuchi, N., Jiménez, E., Lloyd, G., Meir, P., Mendoza, C., Morel, A., Neill, D.A., Nepstad, D., Patiño, S., Peñuela, M.C., Prieto, A., Ramírez, F., Schwarz, M., Silva, J., Silveira, M., Sota Thomas, A., ter Steege, H., Stropp, J., Vásquez, R., Zelazowski, P., Alvarez Dávila, E., Andelman, S., Andrade, A., Chao, K., Erwin, T., Di Fiore, A., Honorio, C., Keeling, E., Killeen, H., Laurance, T.J., Peña Cruz, W.F., Pitman, A., Núñez Vargas, N.C.A., Ramírez-Angulo, P., Rudas, H., Salamão, A., Silva, R., Terborgh, N., Torres-Lezama, J.A., 2009. Drought sensitivity of the amazon rainforest. **Science**. 323, 5919.

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

Phridviraj, M.S.B.; Gururao, C.V.; 2014. Data mining – past, present and future – a typical survey on data streams. **Procedia Technology**. 12, 255-263.

Poncelet, D.M., Cavender, N., Cutright, T.J., Senko, J.M., 2014. As assessment of microbial communities associated with surface mining-disturbed overburden. **Environ. Monit. Assess.** 186, 1917-1929.

Portela, R.; Rademacher, I. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. **Ecological Modelling**, v. 143, n. 1-2, p. 115-146, 2001.

Potter, C., Klooster, S., Hiatt, C., Genovese, V., Castilla-Rubio, J.C., 2011. Changes in the carbon cycle of Amazon ecosystems during the 2010 drought. **Environ. Res. Lett.** 6, 034024.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Raheb, A., Heidari, A., Mahmoodi, S., 2017. Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran. **Catena**, 153, 66-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.035>

Ribeiro, A. I. MECANIZAÇÃO NO PREPARO DE SOLO EM ÁREAS DEGRADADAS POR MINERAÇÃO NA FLORESTA NACIONAL DO JAMARI (RONDÔNIA - BR). [Tese]. Campinas (SP): Pós-Graduação em Máquinas Agrícolas, UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas; 2005.

Ribeiro, A. I.; Longo, R. M.; Maciel, A. J. S.; Melo, W. J., 2004. Produção operacional de equipamentos na recomposição topográfica de áreas degradadas por exploração mineral na floresta nacional do Jamari, Estado de Rondônia, Brasil. **Eng. Ambient.** 1, 65-72.

Ribeiro, A. I.; Longo, R. M., Teixeira Filho, A.; Melo, W. J., 2006. Diagnosis of a compacted area by mining activity, in the Amazon forest, utilizing geoestatistic methods to the mechanical resistance variable to the penetration of the soil. **Acta Amazônica**. 36, 83-90.

Ribeiro, A.I., Fengler, F.H.; Longo, R.M., Medeiros, G.A., Melo, G.F., Peche Filho, A., 2015. Choice of revegetation techniques for degraded areas using environmental damage assessment in the Amazon forest, Brazil. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**. 192, 407-417.

Ribeiro, A.I., Longo, R.M., Fengler, F.H., Medeiros, G.A.; Bressane, A., Crowley, D.E., Melo, W.J., 2016; 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**. 11, 827-833.

Rosenfield, M.F., Müller, S.C., 2017; Predicting restored communities based on reference ecosystems using a trait-based approach. **Forest Ecology and Management**. 391, 176-183.

Rocha, G.P.E., Vieira, D.L.M., Simon, M.F., 2016. Fast natural regeneration in abandoned pastures in Southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**. 370, 93-101.

Rodrigues, R.R., Lima, R.A.F., Gandolfi, S., Nave, A.G., 2009. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**. 142, 1242-1251.

Romesburg, C., 2004. **Cluster Analysis for Researchers**. Lulu Press, North Carolina.

Sá, J. C. M., Cerri, C. C., Lal, R., Dick, W. A., Piccolo, M. C., Feigl, B. E., 2009. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, 104 (1), 56-64.

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

Schoenholtz, S. H.; Miegroet, H. V.; Burger, J. A., 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**. 138, 335-356.

SER, 2004. The SER international primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration, Science and Policy Working Group.

Silva, F. A. S.; Azevedo, C. A. V., 2016. The Assistat software version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **Afr. J. Agric. Res.** 11, 3733-3740.

Smith, N. J. H.; Homma, P. A. A.; Falesi, I.; Serrão, A., 1991. Environmental impacts of resource exploitation in Amazonia. **Global Environmental Change**. 1, 131-320.

Sofi, J., Lone, A. H., Ganie, M. A., Dar, N. A., Bhat, S. A., Mukhtar, M., Dar, M. A., Ramzan, S., 2016. Soil Microbiological Activity and Carbon Dynamics in the Current Climate Change Scenarios: A Review. **Pedosphere**, 26 (5), 577-591.

Sonin, A. A. The physical basis of Dimensional Analysis. 2nd ed. Cambridge: MIT; 2001. p. 57.

Sousa, R., Veiga, M., Zyl, D. V., Telmer, K., Spiegel, S.; Selder, J., 2011. Policies and regulations for Brazil's artisanal gold mining sector: analysis and recommendations. **Journal of Cleaner Production**, 2011, 742-750.

Souza, E. D., Carneiro, M. A. C., Paulino, H. B., Silva, C. A., Buzetti, S., 2006. 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), 323-329.

Stanturf, J.A., Palik, B.J., Dumroese, R.K., 2014. Contemporary forest restoration: A review emphasizing function. **Forest Ecology and Management**. 331, 292-323.

STHDA, 2017. ggplot2 box plot : Easy box and whisker plots maker function [Online] Available at: http://www.sthda.com/english/wiki/ggplot2-box_plot-easy-box-and-whisker-plots-maker-function?url#at_pco=smlwn-1.0&at_si=59009d1fd8605d6e&at_ab=per-2&at_pos=0&at_tot=1 [Accessed in 30 may 2017].

STHDA, 2017a. Principal Component Analysis: How to reveal the most important variables in your data? - R software and data mining [Online] Available at: <http://www.sthda.com/english/wiki/principal-component-analysis-how-to-reveal-the->

most-important-variables-in-your-data-r-software-and-data-mining#at_pco=smlwn-1.0&at_si=592d88792518b999&at_ab=per-2&at_pos=0&at_tot=1 [Accessed in 30 may 2017].

STHDA, 2017b. FactoMineR and factoextra : Principal Component Analysis Visualization - R software and data mining [Online] Available at: <http://www.sthda.com/english/wiki/factominer-and-factoextra-principal-component-analysis-visualization-r-software-and-data-mining> [Accessed in 30 may 2017].

Susyan, E., Wirth, S., Ananyeva, N. D., Stolnikova, E. V., 2011. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia - Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity. **European Journal of Soil Biology**, 47, 169-174.

Suzuki, R., Shimodaira, H., 2006. Pvcust: An R package for assessing the uncertainty in hierarchical clustering. **Oxford Journals**. 22, 1540-1542.

Suzuki, R., Shimodaira, H., 2015. pvcust: **Hierarchical Clustering with P-Values via Multiscale Bootstrap Resampling. R package version 2.0-0.** <https://CRAN.R-project.org/package=pvcust>

Suzuki, T. 2003. Economic and geographic backgrounds of land reclamation in Japanese ports. **Marine Pollution Bulletin**. 43, 226-229.

Tejada, M., Hernandez, M. T., Garcia, C., 2009. Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. **Soil & Tillage Research**, 102, 109-117.

Tomlinson, P., 1984. Evaluating the success of land reclamation schemes. **Landscape Planning**. 11, 187-203.

Tukey, 1977. J.W. Tukey Exploratory data analysis Addison-Wesley, Reading, USA.
Vance E. D., Brookes P.C., Jenkinson D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biol Biochem.**; 19, 703-7.

van der Laan-Luijkx, I.T., van der Velde, I.R., Krol, M.C., Gatti, L.V., Domingues, L.G., Correia, C.S.C., Miller, J.B., Gloor, M., van Leeuwen, T.T., Kaiser, J.W., Basu, S., Clerbaux, C., Peters, W., Wiedinmyer, C., 2015. Response of the Amazon carbon balance to the 2010 drought derived with CarbonTracker South America, **Global Biogeochem. Cycles**. 29, 1092–1108.

Vanicek, V., 1977. Eco-Engineering - an ecological approach of land reclamation and improvement to landscape environment. **Landscape Planning**. 4, 73-84.

Wang, S.; Liu, C.; Zhang, H., 2011. 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.

Wickham, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2009.

Xiao, W.; Hu, Z.; Fu, W., 2014. Zoning of land reclamation in coal mining area and new progresses for the past 10 years. **Int. J. Coal. Sci. Technol.** 1, 177-183.

Yada, M.M., Mingotte, F.L.C., Melo, W.J., Melo, G.P., Melo, V.P., Longo, R.M.,

Xu, L., Samanta, A., Costa, M.H., Ganguly, S., Nemani, R.R., Myneni, R.B., 2011. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophys. Res. Lett.** 38, L07402.

Yada, M.M., Mingotte, F.L.C., Melo, W.J., Melo, G.P., Melo, V.P., Longo, R.M., Ribeiro, A.I., 2015; Chemical and Biochemical Properties of Soils Degraded by tin Mining and in a Rehabilitation Phase in the Amazon Basin. **R. Bras. Ci. Solo.** 39,

Zlokarnik, M. Dimensional Analysis and Scale-Up in Theory and Industrial Application. In: Zlokarnik, M. **Pharmaceutical Process Scale-Up**. Austria: CRC Press, 2002. p.1-57.