

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

JOSIANE LOURENCETTI

**RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DECAPITADO
SOB INTERVENÇÃO ANTRÓPICA HÁ 30 ANOS**

Ilha Solteira

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JOSIANE LOURENCETTI

**RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DECAPITADO SOB
INTERVENÇÃO ANTRÓPICA HÁ 30 ANOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof. Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini
Orientadora

Prof. Dr. Marcelo Andreotti
Coorientador

Ilha Solteira

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L892r Lourencetti, Josiane.
Restauração ecológica de um latosolo do latossolo vermelho decapitado
sob intervenção antrópica há 30 anos / Josiane Lourencetti. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2023
155 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2023

Orientador: Carolina dos Santos Batista Bonini
Co-orientador: Marcelo Andreotti
Inclui bibliografia

1. Qualidade de solo. 2. Adubação verde. 3. *Urochloa decumbens*. 4. Matéria
orgânica. 5. Solo decapitado.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Restauração ecológica de um Latossolo Vermelho decapitado sob intervenção antrópica há 30 anos

AUTORA: JOSIANE LOURENCETTI

ORIENTADORA: CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI

COORDENADOR: MARCELO ANDREOTTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Carolina Santos Batista Bonini

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)

Departamento de Ciência Florestal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

gov.br

Documento assinado digitalmente

MARLENE CRISTINA ALVES

Data: 27/11/2023 18:23:35-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. MARLENE CRISTINA ALVES (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. JORGE JOÃO DELFIM (Participação Virtual)

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Jorge João Delfim

Vagner do Nascimento

Prof. Dr. VAGNER DO NASCIMENTO (Participação Virtual)

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Profa. Dra. VIVIANE CRISTINA MODESTO (Participação Virtual)

ETEC Frei Arnaldo Maria de Itaporanga / Centro Paula Souza

gov.br

Documento assinado digitalmente

VIVIANE CRISTINA MODESTO

Data: 27/11/2023 19:44:46-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ilha Solteira, 27 de novembro de 2023

DEDICATÓRIA

A todos os pesquisadores, alunos e profissionais que compreendem profundamente a vitalidade do solo e a sua preservação como pilares fundamentais para o sucesso dos sistemas de produção. Seu comprometimento e conhecimento são a luz que ilumina o caminho para um futuro sustentável. Que sua dedicação inspire e motive a todos nós a cuidar e valorizar esse recurso tão precioso para as gerações presentes e futuras.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser minha fortaleza nos momentos de fraqueza, por conceder-me sabedoria nos momentos de indecisão e por me proporcionar entendimento diante das mudanças.

A Professora Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini por todo conhecimento valioso que compartilhou comigo ao longo desta jornada. Seu comprometimento e dedicação como educadora inspiraram-me profundamente.

Ao Professor Dr. Marcelo Andreotti pelo seu generoso aceite em coorientar este trabalho de pesquisa. Sua contribuição inestimável e expertise neste campo específico têm sido fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

A Professora Dra. Marlene Cristina Alves por dedicar seu valioso tempo para me auxiliar nessa jornada acadêmica. Sua influência positiva deixará uma marca duradoura em minha vida.

Ao Professor Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto pelo direcionamento oferecido durante o processo de pesquisa e pelo acompanhamento dedicado em campo.

Ao Dr. José Cambuim por ter a oportunidade de aprender com um profissional tão respeitado e dedicado como você.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão, que dedicaram tempo e conhecimento para auxiliar no campo, foi fundamental para o desenvolvimento desta tese.

Aos membros do Laboratório de Análise de Solo pelo auxílio prestado na realização das análises. Sua dedicação incansável e esforço inabalável foram fundamentais para o sucesso e qualidade dos resultados obtidos.

Por fim, aos meus amigos e familiares, cujo carinho e compreensão foram inestimáveis nos momentos em que precisei me dedicar exclusivamente aos estudos.

EPÍGRAFE

*Sua misericórdia se estende,
de geração em geração,
sobre os que o temem.
(Lu 1,50)*

*"O amor pelo estudo do Solo
deveria servir para uma condição de grande sucesso das pesquisas futuras,
não só para as pessoas, mas também para a natureza, e a confiança sólida em
sucesso."
(Vasily Dokuchaev)*

APRESENTAÇÃO

A tese que apresento oferece conhecimento sobre a recuperação do solo, estando baseada nos atributos físicos, químicos e da avaliação arbórea de um Latossolo Vermelho distrófico em processo de recuperação há 30 anos, com a utilização de calagem, gesso e espécies vegetais.

A tese está apresentada em quatro capítulos e o formato que introduz cada capítulo é particularmente interessante, apresentando o conteúdo do mesmo, os objetivos, a metodologia, os resultados e um resumo do capítulo, juntamente com a conclusão e as referências bibliográficas.

O primeiro capítulo foi denominado como 'Análise bibliométrica: recuperação de áreas degradadas pela construção de hidrelétricas' e apresenta um referencial teórico de duas bases de dados, sobre as principais publicações de recuperação de áreas degradadas.

O segundo capítulo foi denominado como 'Evolution of Soil Chemical Fertility in an Area under Recovery for 30 Years with Anthropic Intervention' e apresenta os atributos químicos de qualidade do solo, tais como: teores de cálcio e potássio, matéria orgânica, acidez potencial e pH ao longo de 30 anos de recuperação.

O terceiro capítulo foi denominado como 'Recuperação do solo em processo de reabilitação há 30 anos sob espécies de adubação verde' e apresenta dados da vegetação, identificando as espécies arbóreas nativas e seu desenvolvimento no período de 2007 a 2023, em área degradada com recuperação natural ocupada com *Urochloa decumbens* e espécies nativas do Cerrado.

E finalmente, o quarto capítulo foi denominado como 'Monitoramento dos atributos físicos do solo em área de recuperação por 30 anos utilizando espécies vegetais, calcário e gesso' e apresenta o comportamento da distribuição do tamanho de poros e densidade do solo ao longo de 30 anos de recuperação.

RESUMO

A utilização intensa dos solos tem levado a um processo de degradação, caracterizado por fatores insustentáveis, capazes de causar a diminuição de sua produtividade. A investigação e a aplicação de técnicas de recuperação, com a utilização de indicadores qualitativos e quantitativos, trouxe a possibilidade da recuperação ecológica destes locais. Neste contexto, a principal dificuldade consiste no estabelecimento de um horizonte A, capaz de dar suporte ao surgimento de outros horizontes. Este projeto objetiva avaliar os atributos físicos, químicos e a reabilitação de espécies vegetais de um Latossolo Vermelho distrófico, que está em processo de recuperação há 30 anos, com a utilização de calagem, gesso e espécies vegetais. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, constituído por sete tratamentos, sendo eles: Solo mobilizado (vegetação espontânea); Mucuna-preta (MP) - (*Stizolobium Aterrimum*); Guandu (G) – (*Cajanus cajan*) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (FP) – (*Canavalia ensiformis*); Calcário+MP; Calcário+G até 1994, após substituído por FP; Calcário+Gesso+MP; Calcário+Gesso+G até 1994, após substituído por FP. Os sete tratamentos foram instalados em 1992 e permaneceram por trinta anos, em 1999 implantou-se a *Urochloa decumbens*, com quatro repetições. Foram avaliados atributos físicos e químicos do solo, o desenvolvimento das espécies arbóreas que surgiram naturalmente (altura e diâmetro) e a taxa de crescimento. Foi realizada a análise estatística dos resultados obtidos, utilizando de correlação simples e comparação das médias no nível de 5% de significância. Os resultados evidenciaram uma eficácia notável na aprimoração da fertilidade do solo, observando um aumento significativo na concentração de matéria orgânica de 10 para 16,33 mg.dm⁻³ no período compreendido entre 2010 e 2022 no tratamento com mucuna. Além disso, registrou-se a presença de dezesseis novas espécies nativas do cerrado, destacando-se o impacto na variação da macroporosidade e densidade do solo na camada superficial ao longo dos anos estudados. Conclui-se que ocorreu a melhora dos atributos físicos, químicos e biológicos das plantas na área em processo de recuperação ao longo dos anos estudados, destacando-se, sobretudo, na camada de 0-0,10m.

Palavras-chave: qualidade de solo; adubação verde; *Urochloa decumbens*; matéria orgânica; solo decapitado.

ABSTRACT

The intense use of soil has led to a degradation process, characterized by unsustainable factors, capable of causing a decrease in productivity. The investigation and application of recovery techniques, using qualitative and quantitative indicators, brings the possibility of ecological restoration of these sites. In this context, the main difficulty lies in establishing an A horizon, capable of supporting the emergence of other horizons. This project aims to evaluate the physical and chemical properties of a decapitated Oxisol, which has been in the process of recovery for 30 years, using liming, gypsum and plant species. A randomized block experimental design was used, consisting of seven treatments, namely: Mobilized soil (spontaneous vegetation); *Stizolobium Aterrimum* (SA); *Cajanus cajan* (CC) until 1994, after being replaced by *Canavalia ensiformis* (CE); Limestone+SA; Calcário+CC until 1994, after being replaced by CE; Limestone+Gypsum+SA; Limestone+Gesso+CC until 1994, after being replaced by CE. The treatments were installed in 1992 and remained for seven years, in 1999 *Urochloa decumbens* was implemented, with four replications. Physical and chemical attributes of the soil were evaluated. The development of tree species that regenerated naturally (height and diameter) and growth rate were also evaluated. Statistical analysis of the results obtained was carried out, using simple correlation and comparison of means at a 5% significance. It is concluded that there was an improvement in the physical, chemical and biological attributes of the plants in the area undergoing recovery over the years studied, particularly in the 0-0.10m layer.

Keywords: soil quality; cover crop; *Urochloa decumbens*; organic matter; soil degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.	27
Figura 1.2 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.	30
Figura 1.3 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.	31
Figura 1.4 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.	32
Figura 1.5 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.	35
Figura 1.6 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.	37
Figura 1.7 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.	41
Figura 1.8 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.	42
Figura 1.9 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.	43
Figura 1.10 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.	46
Figura 1.11 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.	48
Figura 1.12 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.	51
Figura 1.13 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.	52
Figura 1.14 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.	53
Figura 1.15 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.	56
Figure 2.1 - (a) Area map and (b) general view of the decapitated area showing the 8.6 m thick cut. Selviria—MS (Brazil).	67
Figure 2.2 - Total annual precipitation and average annual temperature in the Municipality of Selvíria-MS.	69
Figure 2.3 - Photographic record of the experimental area from 1992 to 2022, Selviria—MS (Brazil).	70
Figure 2.4 - Response surface plots for phosphorus ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$): (a) 0–0.10 m and (b) 0.10–0.20 m and organic matter ($\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$): (c) 0–0.10 m and (d) 0.10–0.20 m, depending on the years and treatments studied. Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.	73
Figure 2.5 - Response surface plots for pH: (a) 0–0.10 m and (b) 0.10–0.20 m and base saturation (%): (c) 0–0.10 m and (d) 0.10–0.20 m, depending on the years and treatments studied. Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.	75
Figura 3.1 - Precipitação total anual e temperatura média anual do Município de Selvíria-MS.	92
Figura 3.2 - Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,6 m de espessura.	94
Figura 3.3 - Registro fotográfico da área experimental de 1992 a 2023.	95

Figura 3.4 - A: Medição do diâmetro do caule das espécies arbóreas e B: Medição da altura das espécies arbóreas.	97
Figura 3.5 - Três das dezesseis novas espécies encontradas na área experimental. A: Barbatimão. B: Marmelo-de-cachorro. C: Pequi.	100
Figura 3.6 - Número de todas as espécies arbóreas encontradas por tratamento e por bloco na área degradada.	103
Figura 3.7 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2007, com imagem do Google Earth importada no QGis.	105
Figura 3.8 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2013, com imagem do Google Earth importada no QGis.	106
Figura 3.9 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2023, com imagem do Google Earth importada no QGis.	107
Figura 3.10 - Evolução das espécies nativas do cerrado no período de 2007 a 2023, com imagem do Google Earth importada no QGis.	108
Figura 3.11 - Todas as espécies arbóreas encontradas na área distribuídas por família.	115
Figura 3.12 - Taxa de crescimento de plantas da espécie <i>Machaerium acutifolium</i> Vogel (Jacarandá do Campo) de Outubro/2007 a Outubro/2013 e Março/2023, e número de indivíduos total e por tratamento. Selvíria, MS.	116
Figura 3.13 - Número de plantas da espécie <i>Machaerium acutifolium</i> Vogel (Jacarandá do Campo).	116
Figura 4.1 - Imagem de satélite indicando a localização da área experimental. Selvíria – MS, 2023.	126
Figura 4.2 - Precipitação total anual e temperatura média anual do Município de Selvíria-MS.	127
Figura 4.3 - Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,6 m de espessura.	129
Figura 4.4 - Croqui da Área Experimental. Selvíria-MS, 2023.	131
Figura 4.5 - A: trincheira para coleta de amostras indeformadas; B: anéis saturados em água; C: amostras na mesa de tensão; D: amostras na estufa.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dez últimas publicações.	33
Tabela 1.2 - Dez periódicos mais citados.	33
Tabela 1.3 - Dez últimas publicações.	44
Tabela 1.4 - Dez periódicos mais citados.	45
Tabela 1.5 - Dez últimas publicações.	55
Tabela 1.6 - Dez periódicos mais citados.	56
Table 2.1 - Initial characterization (1992), Selviria—MS (Brazil).	67
Table 2.2 - Treatments used in the experimental area (1992–2022) Selviria—MS (Brazil).	73
Table 2.3 - Correlation of Pearson of soil attributes studied (P (mg·dm ⁻³), pH, OM (g·dm ⁻³), and V (%)). Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.	74
Table 2.4 - Mean values and coefficients of variation for phosphorus (P)—mg·dm ⁻³ , organic matter (OM)—g·dm ⁻³ , pH, and base saturation (V)—%, depending on the treatments studied in the layers of 0.00–0.10 and 0.10– 0.20 m. Selviria, MS (Brazil). 1993–2022.	79
Table 2.5 - Unfolding of the interaction between year of assessment and treatment regarding the mean values of P (mg dm ⁻³) and MO (g dm ⁻³), in the layers of 0.00-0.10 and 0.10-0.20m. Selviria, MS (Brazil). 1993 to 2022.	80
Table 2.6 - Breakdown of the interaction between year of evaluation and treatment regarding mean pH values and V(%), in the layers of 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m. Selviria, MS (Brazil). 1993 to 2022.	81
Tabela 3.1 - Caracterização inicial (1992).	96
Tabela 3.2 - Levantamento florístico de todas as espécies arbóreas presentes na área.	101
Tabela 3.3 - Espécies arbóreas presentes na área e nível de sucessão vegetal.	106
Tabela 3.4 - Levantamento florístico das espécies arbóreas com altura de medição presentes na área.	114
Tabela 4.1 - Caracterização inicial (1992). Selvíria – MS.	131
Tabela 4.2 - Valores médios para a macroporosidade – MA (m ³ m ⁻³), microporosidade – MI (m ³ m ⁻³), porosidade total - PT (m ³ m ⁻³), densidade do solo – DS (kg dm ⁻³), teste F e coeficiente de variação (CV%), nas camadas de solo estudadas (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m), Selvíria - MS. 1992 a 2023.	141
Tabela 4.3 - Desdobramento da interação entre ano de avaliação e tratamento referente aos valores médios de macroporosidade (m ³ m ⁻³), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m.	

Selv3ria - MS. 1992 a 2023. 143

Tabela 4.4 - Desdobramento da intera33o entre ano de avalia33o e tratamento referente aos valores m3dios de microporosidade ($m^3 m^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m.

Selv3ria - MS. 1992 a 2023. 145

Tabela 4.5 - Desdobramento da intera33o entre ano de avalia33o e tratamento referente aos valores m3dios de porosidade total ($m^3 m^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m.

Selv3ria - MS. 1992 a 2023. 146

Tabela 4.6 - Desdobramento da intera33o entre ano de avalia33o e tratamento referente aos valores m3dios de densidade do solo ($kg dm^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m.

Selv3ria - MS. 1992 a 2023. Fonte: Pr3prio autor (2023). 148

SUMÁRIO

I INTRODUÇÃO GERAL	17
II OBJETIVO GERAL	19
II OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
III HIPÓTESE	20

CAPÍTULO 1 - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: RECUPERAÇÃO DE SOLOS LOCALIZADOS EM ÁREAS DEGRADADAS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO DE HIDRELÉTRICAS

1.1 Introdução	22
1.2 Material e Métodos	24
1.3 Resultados e Discussão	25
<i>1.3.1 Análise realizada com o termo “recuperação de áreas degradadas”</i>	<i>25</i>
<i>1.3.2 Análise realizada com o termo “recuperação de área degradada” associado a “construção de hidrelétrica” ou “compactação do solo”</i>	<i>36</i>
<i>1.3.3 Análise realizada com o termo “recuperação de área degradada” associado a “espécies de adubação verde” ou “bioindicador de recuperação do solo”</i>	<i>47</i>
1.4. Conclusão	57
REFERÊNCIAS	58

CAPÍTULO 2 - EVOLUTION OF SOIL CHEMICAL FERTILITY IN AN AREA UNDER RECOVERY FOR 30 YEARS WITH ANTHROPIC INTERVENTION

2.1 Introduction	62
2.2 Materials and Methods	65
2.3 Results and Discussion	71
2.4 Conclusions	82
REFERENCES	82

CAPÍTULO 3 - RECUPERAÇÃO DO SOLO EM PROCESSO DE REABILITAÇÃO HÁ 30 ANOS SOB ESPÉCIES DE COBERTURA DO SOLO

3.1 Introdução	87
3.2 Material e Métodos	91

3.3 Resultados e Discussão	97
3.4 Conclusão	117
REFERÊNCIAS	117

CAPÍTULO 4 - MONITORAMENTO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE RECUPERAÇÃO POR 30 ANOS UTILIZANDO ESPÉCIES DE COBERTURA DO SOLO INTRODUZIDAS E ESPONTÂNEAS, CALCÁRIO E GESSO	121
4.1 Introdução	122
4.2 Material e Métodos	125
<i>4.2.1 Área de estudo e delineamento experimental</i>	<i>125</i>
<i>4.2.2 Atributos físicos do solo estudados</i>	<i>131</i>
<i>4.2.3 Análise estatística</i>	<i>135</i>
4.3 Resultados e Discussão	135
4.4 Conclusão	147
REFERÊNCIAS	148
 III CONSIDERAÇÕES FINAIS	 152

I INTRODUÇÃO GERAL

Com a remoção da cobertura vegetal natural de um solo e sua subsequente utilização, ocorre a interrupção do equilíbrio estabelecido ao longo de milênios pela natureza no ecossistema, resultando em um comportamento diferenciado do solo. Esse processo desencadeia alterações nas características essenciais que determinam a qualidade do solo, culminando em sua degradação. Tal degradação ocorre quando a vegetação nativa e a fauna são destruídas, removidas ou expulsas; além da perda, remoção ou sepultamento da camada fértil do solo.

A construção de uma obra de engenharia com o intuito de gerar energia pode acarretar sérios danos ambientais. A construção de barragens e a instalação de usinas hidrelétricas, por exemplo, podem comprometer significativamente o solo, resultando na perda de biodiversidade e no desequilíbrio do ecossistema local. Isso ocorre porque, juntamente com a remoção da vegetação, são eliminados os meios de regeneração biótica do solo, como o banco de sementes, o banco de plântulas, as chuvas de sementes e a rebrota. Esses elementos são essenciais para a recuperação e revitalização do solo, contribuindo para a manutenção da diversidade biológica e da estabilidade do ecossistema local. Portanto, é fundamental considerar cuidadosamente os impactos ambientais associados a projetos de geração de energia, buscando medidas mitigadoras e alternativas sustentáveis para minimizar danos futuros.

Com o avanço da degradação dos solos, seus atributos são significativamente afetados. Um dos problemas mais críticos nas áreas degradadas é a compactação do solo, que causa alterações nos atributos fundamentais, em especial no volume e na distribuição dos macroporos e microporos. Essas características exercem uma influência substancial no crescimento das espécies vegetais e na capacidade da fauna do solo de sobreviver em regiões que se tornam inabitáveis.

A recuperação de áreas degradadas requer uma abordagem abrangente que leve em consideração os componentes do sistema solo-planta-atmosfera, com objetivo de promover a reabilitação integrada dos processos biológicos. Para orientar efetivamente esse processo, é crucial restabelecer a fertilidade e outros atributos do solo, a fim de proporcionar condições iniciais adequadas para a revegetação.

Ao planejar a recuperação de uma área degradada, o principal desafio é estabelecer um horizonte inicial para permitir que o processo de recuperação natural ocorra, possibilitando o surgimento de horizontes adicionais. Durante esse processo, a seleção adequada de espécies e a determinação de seus requerimentos nutricionais são passos cruciais para alcançar o sucesso desejado. Uma estratégia eficaz é utilizar espécies de crescimento rápido, como as leguminosas, que contribuem para o aumento dos níveis de nitrogênio no solo.

Ao selecionar espécies vegetais para auxiliar na regeneração de solos degradados, é fundamental levar em conta sua capacidade de adaptação a ambientes desfavoráveis. Um exemplo notável é a *Urochloa decumbens*, amplamente empregada na recuperação de áreas degradadas devido à sua habilidade em se adaptar a diversos tipos de solo, além de sua notável tolerância a locais com baixa fertilidade.

A utilização de bioindicadores para avaliar a qualidade do solo é uma prática vantajosa para identificar alterações decorrentes do uso e manejo mais precocemente. A avaliação do equilíbrio ambiental do solo pode ser realizada por meio da observação de organismos vivos, incluindo a macrofauna e a vegetação, a fim de monitorar as tendências ao longo do tempo. Isso permite uma compreensão mais completa da saúde do solo e ajuda a tomar medidas proativas para evitar problemas futuros.

II OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa consistiu em avaliar os atributos físicos, químicos e biológicos das plantas de um Latossolo Vermelho distrófico que está em processo de recuperação há 30 anos, com a utilização de calagem, gesso e espécies de cobertura do solo introduzidas e surgidas espontaneamente, tendo como finalidade traçar comparações ao longo dos anos, visando à recuperação ecológica do solo e a proposição de uma utilização adequada.

II OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os indicadores químicos da qualidade do solo, tais como: os teores de fósforo, matéria orgânica, pH, e saturação por bases.
- Identificar as espécies arbóreas nativas do cerrado, que surgiram espontaneamente em área degradada com reabilitação natural, cultivado com *Urochloa decumbens* desde 1999.
- Determinar os indicadores físicos da qualidade do solo, tais como: porosidade total, macroporosidade, microporosidade e densidade.

III HIPÓTESE

Diante do problema de degradação do solo e da necessidade de se estabelecer uma solução que possibilite realizar a reabilitação de ecossistemas, este trabalho teve o propósito de compreender os fatos associados à resiliência dos ecossistemas.

O estudo vem sendo desenvolvido desde 1992, em 2011 houve um monitoramento e foi constatado uma evolução positiva dos atributos do solo e agora após 20 anos, pretende-se avaliar o efeito dos tratamentos no restabelecimento do horizonte A de um solo decapitado.

CAPÍTULO 1 - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: RECUPERAÇÃO DE SOLOS LOCALIZADOS EM ÁREAS DEGRADADAS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO DE HIDRELÉTRICAS

RESUMO

A utilização inadequada dos recursos naturais acarreta diversas consequências ambientais e sociais nos ecossistemas, comprometendo a qualidade do solo e reduzindo a capacidade de regeneração natural da área utilizada. Nesse sentido, este trabalho teve como propósito analisar o comportamento bibliométrico da produção científica internacional acerca da recuperação de áreas degradadas pela construção de hidrelétricas. A análise foi realizada no período de 1964 a 2023 nas bases de dados Scopus e Web of Science, utilizando o termo *recovery of degraded areas* em combinação com *hydroelectric construction*, *soil compaction*, *cover crop species*, *soil recovery bioindicator*. O processamento dos dados e a elaboração dos gráficos foi realizada no software VOSviewer, utilizando como método de análise *association strength*. Os resultados permitiram concluir que nos últimos anos houve aumento do número de publicações, tendo Alves, Kitamura, Martins, Paiva e Reichert como importantes autores nessa área. E sinalizaram que ainda falta pesquisas relacionadas a esta fronteira do conhecimento.

Palavras-chave: compactação do solo; bioindicadores; espécies de adubação verde; mapeamento bibliométrico.

ABSTRACT

The inappropriate use of natural resources leads to several environmental and social consequences for ecosystems, compromising soil quality and reducing the natural regeneration capacity of the area used. In this sense, this work aimed to analyze the bibliometric behavior of international scientific production regarding the recovery of areas degraded by the construction of hydroelectric plants. The analysis was carried out from 1964 to 2023 in the Scopus and Web of Science databases, using the term *recovery of degraded areas* in combination with *hydroelectric construction*, *soil compaction*, *cover crop species*, *soil recovery bioindicator*. Data processing and graphing were carried out in the VOSviewer software, using *association strength* as an analysis method. The results allowed us to conclude that in recent years there has

been an increase in the number of publications, with Alves, Kitamura, Martins, Paiva and Reichert as important authors in this area. And they indicated that there is still a lack of research related to this frontier of knowledge.

Keywords: soil compaction; bioindicators; cover crop species; bibliometric mapping.

1.1 Introdução

A atividade humana tem um impacto significativo na degradação dos ecossistemas naturais, especialmente quando se trata da remoção de camadas de solo. Essa prática pode levar a mudanças drásticas no espaço geográfico, uma vez que a cobertura vegetal é removida, causando a deslocação da fauna local. Um exemplo de como essa degradação ocorre é por meio do estabelecimento de áreas de empréstimo, que surgem como resultado da construção de barragens para usinas hidrelétricas (LIMA *et al.*, 2021; FARDIN *et al.*, 2021; OLIVEIRA, DANTAS, ARAUJO, 2020).

As técnicas utilizadas para reabilitar áreas degradadas têm como objetivo recuperar as características originais do solo e controlar os agentes responsáveis pelo processo de degradação. Para alcançar esse objetivo, é necessário realizar estudos da estrutura das comunidades e avaliar a capacidade de resiliência do ecossistema. Existem dois métodos principais para realizar essa recuperação: os métodos diretos, que fazem uso de práticas mecânicas e químicas, e métodos indiretos, que utilizam de espécies vegetais para acelerar o processo de recuperação (CARVALHO *et al.*, 2017).

O uso de adubos verdes estabelece relações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio, o que resulta em um aumento deste nutriente no solo. Isso pode permitir uma redução nos gastos com adubação nitrogenada, além disso, a alta produção de biomassa dos adubos verdes contribui para o aumento do teor de matéria orgânica do solo, isso beneficia a estruturação do solo e aumenta sua capacidade de retenção de água e nutrientes, favorecendo o crescimento das plantas (GAO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2022).

A utilização de diferentes técnicas para recuperação de solos degradados tem se tornado cada vez mais frequente. Uma dessas técnicas é o uso de resíduos e a implantação de espécies vegetais da família Fabaceae, especialmente *Acacia*

mangium Willd, devido à sua rapidez de crescimento, rusticidade, alta adaptabilidade a solos ácidos e inférteis, e seu potencial nitrificante (SILVA *et al.*, 2020). Ao implantar espécies de cobertura vegetal de crescimento rápido, é possível estabelecer organismos no solo que melhoram os atributos físicos, químicas e microbiológicos do solo (KAMAU *et al.*, 2017).

O estudo da macrofauna do solo desempenha um papel crucial na cadeia alimentar do solo, uma vez que ela pode acelerar o crescimento populacional e a atividade de microrganismos ou intensificar a atividade de populações microbianas responsáveis pela mineralização e humificação da matéria orgânica, fornecendo assim nutrientes disponíveis para as plantas (KITAMURA *et al.*, 2020). Além disso, os artrópodes são sensíveis às mudanças ambientais, o que os torna úteis como bioindicadores. Os índices ecológicos, como a diversidade, podem ser usados para avaliar modificações nas estruturas ecológicas, como a redução na riqueza de espécies nas comunidades (PEREIRA *et al.*, 2018).

O monitoramento dos ecossistemas restaurados é um passo crucial, independentemente do método aplicado. Esse processo ajuda a identificar os indicadores de desenvolvimento do ecossistema e a detectar a necessidade de ajustes e melhorias. É possível agrupar os indicadores em três categorias principais: composicionais, estruturais e funcionais (MARTINS *et al.*, 2022). Os indicadores composicionais são usados para avaliar a biodiversidade do ecossistema, incluindo a composição de espécies, taxas de sobrevivência e grupos ecológicos. Já os indicadores estruturais estão relacionados às respostas quantitativas da planta e da floresta, como altura, diâmetro, biomassa e área basal. Por fim, os indicadores funcionais representam funções e serviços realizados pelo ecossistema, como os atributos físico-químicos e a ciclagem de nutrientes. O monitoramento contínuo desses indicadores pode fornecer informações importantes para o manejo adaptativo ou corretivo do ecossistema restaurado (PRACH; WALKER, 2019).

Muitas vezes, a regeneração natural da cobertura vegetal em uma área degradada é lenta e incerta, devido à competição com as gramíneas e às queimadas rotineiras, que dificultam o estabelecimento das plantas e reduzem o vigor do banco de sementes. Uma forma eficaz de reverter esse cenário é a implantação de sistemas silvipastoril, que aumentam os insumos de biomassa e cobertura do solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a atividade biológica e o sequestro de

carbono (FAUSTINO; MARCIANO, 2021; POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021 e SHIBU; DOLLINGER, 2019).

Com o objetivo de analisar o comportamento bibliométrico da produção científica internacional sobre recuperação de áreas degradadas com a utilização de espécies de adubação verde, resultantes da construção de hidrelétricas, foi realizada uma busca de pesquisas publicadas em base de dados da Scopus e Web of Science. Além de conhecer o cenário global da temática, o estudo propôs analisar as redes que caracterizam a produção internacional por meio de técnicas avaliativas e relacionais, com o intuito final de auxiliar pesquisadores na identificação de publicações científicas relevantes para futuras pesquisas na área.

1.2 Material e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas. A primeira etapa consistiu na escolha dos termos que comporiam a pesquisa centrada na recuperação de uma área degradada em função da retirada de solo para construção da barragem de uma usina hidrelétrica. Dessa maneira, foram realizadas três análises bibliométricas: I. Recuperação áreas degradadas, II. Recuperação de área degradada associada a construção de hidrelétrica ou compactação do solo, III. Recuperação de área degradada associada a espécies de adubação verde ou bioindicador de recuperação do solo.

A segunda etapa consistiu na coleta dos dados de produção científica mundial baseados em artigos publicados em periódicos e revisões bibliográficas indexados em dois bancos de dados online: Science Citation Indexed Expanded - Web of Science (WoS) e Scopus, com a finalidade de integrar os melhores resultados. E a exportação foi realizada em dois formatos: csv e txt.

A coleta foi realizada no dia 07 do mês de julho (2023), considerando o período de 1964 a 2023, por meio do campo “tópico”, que considera o título, resumo e palavras-chave dos autores de cada registro. Como critério de seleção dos dados foram realizadas três análises, da seguinte forma:

- Análise 1: foram utilizados os termos (“recovery of degraded areas”); e foram obtidos 2016 documentos na base Scopus e 338 na base Web of Science.

- Análise 2: foram utilizados os termos (“recovery of degraded areas” AND “hydroelectric construction” OR “soil compaction”); e foram obtidos 41 documentos na base Scopus e 911 na base Web of Science.

- Análise 3: foram utilizados os termos (“recovery of degraded areas” AND “green manure species” OR “soil recovery bioindicator”); e foram obtidos 21 documentos na base Scopus e 13 na base Web of Science.

Na terceira etapa foi realizado o processamento dos dados no software VOSviewer, utilizando como método de análise a *association strength* por meio das ferramentas *co-occurrence*, *all keywords*, *bibliographic coupling*, *authors*, *co-authorship* e *countries* para elaborar os gráficos, que descreveram a co-ocorrência de termos, principais autores, citações, publicações, periódicos mais citados e colaboração dos países.

Os mapas gerados pelo software ora mencionados enfatizam a formação de clusters. Estes, no contexto da análise realizada, caracterizam-se como conglomerados de cooperação, em que os membros apontados efetivaram algum nível de ‘contato’.

1.3 Resultados e Discussão

1.3.1 Análise realizada com o termo “recuperação de áreas degradadas”

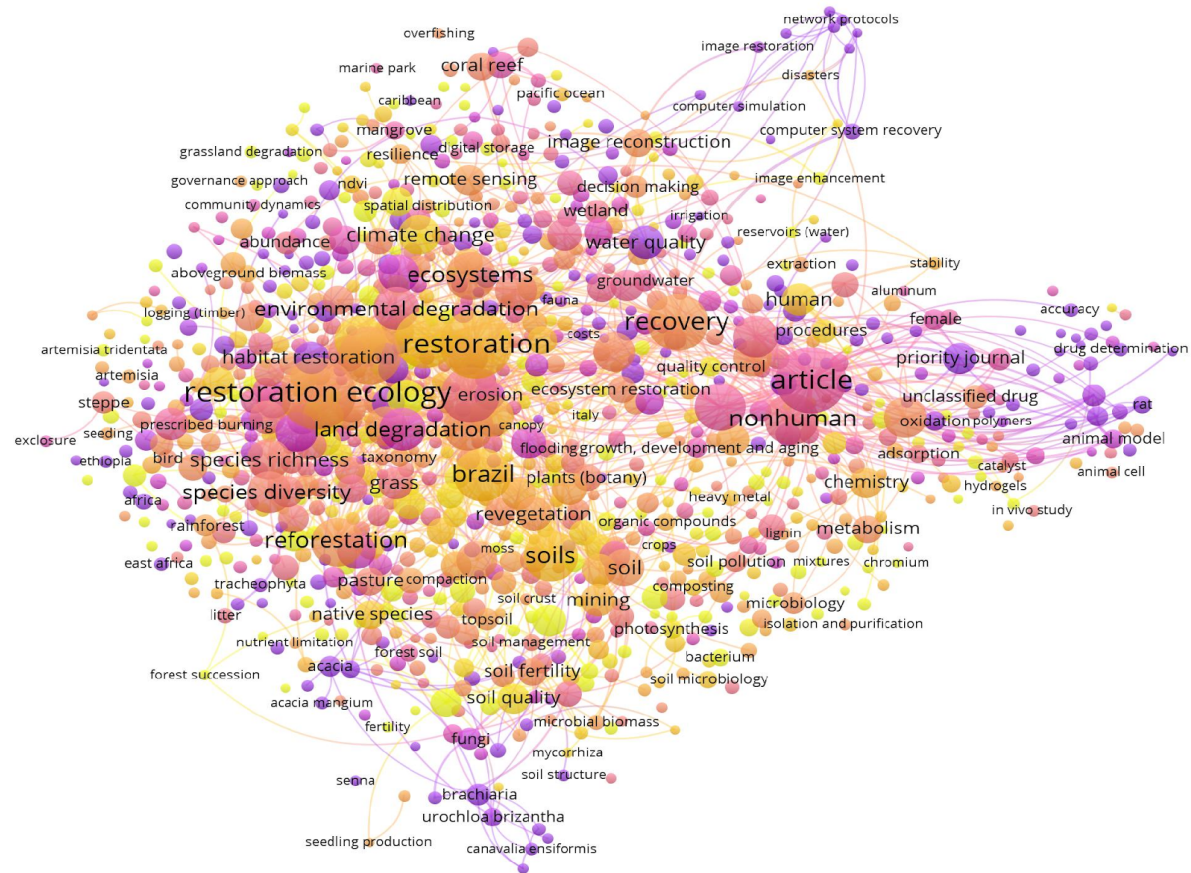
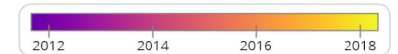
A pesquisa pelo termo “recuperação de área degradada” na base de dados Scopus retornou 2016 documentos no período de 1969 a 2023, desses 1745 são artigos e estão distribuídos, em maior número, entre cinco revistas: Revista Árvore, Forest Ecology and Management, Restoration Ecology, Forest Science e Land Degradation & Development. Dos artigos publicados 100 foram produzidos por pesquisadores da Unesp e 94 pela Academia Chinesa de Ciências, sendo que 634 deles foram publicados no Brasil.

Na base de dados Web of Science, a pesquisa retornou 338 documentos no período de 2002 a 2023, desses 324 são artigos e estão distribuídos, em maior número, entre três revistas: Revista Árvore, Forest Science e Revista Brasileira de Ciência do Solo. Dos artigos publicados, 42 foram produzidos por pesquisadores da Unesp e 32 pela Universidade Federal de Viçosa, sendo 243 deles publicados no Brasil.

A primeira visualização e análise realizada foi com o método de palavra-chave, utilizando os dados obtidos na base de dados Scopus e importados para o software de visualização VOSViewer. O mapa obtido é apresentado na Figura 1.1.

O mapa apresenta a ocorrência de palavras, ou seja, palavras que são mencionadas em conjunto nos trabalhos publicados e investigados neste estudo. O mapa sugere a existência de 3 conglomerados de termos. O primeiro mais destacado dos clusters (em amarelo) está centrado em torno da restauração. Já o cluster segundo em termos de destaque (em laranja) está centrado em torno da restauração ecológica. Por fim, último cluster formado está centrado no tema na vegetação (em rosa) e vem se destacando a partir de 2014. Outros temas ainda são pouco estudados, mas devem ser abordados em trabalhos futuros, como a germinação e o sensoriamento remoto.

Figura 1.1 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.

 VOSviewer

Fonte: Próprio autor (2023).

A segunda visualização e análise realizada foram o mapeamento bibliométrico dos principais autores nas duas bases de dados consultadas. A base da Scopus (Figura 1.2) pela contagem fracionária revelou a existência de 1991 autores, divididos em 6 grupos de pesquisa. Consideramos que os autores deveriam ter pelo menos 1 documento publicado, se destacaram na análise os seguintes autores: Longo, R. M.; Ribeiro, A. I.; Clark, S.; Edwards, A. J.; Bonini, C. S. B.; Alves, M. C.; Adnan M. e Holscher, D. Na base da Web of Science (Figura 1.3) foi avaliado a co-autoria e identificado 1380 autores, divididos em 5 grupos de pesquisa, e se destacaram nessa análise Sebastião, M. V.; Paiva, H. N.; Longo, R. M.; e Ribeiro, A. I.

A terceira análise realizada foi na base de dados da Web of Science com o número de citações e publicações ao longo do tempo (Figura 1.4), do total de 338 publicações reportou 1311 citações, com média de 3,88 citações por artigo. E o indicador de desempenho da produção científica dos autores (Índice h) foi igual a 16. Observa-se um avanço da pesquisa sobre a temática, principalmente até o ano de 2018 no qual foram identificadas 26 publicações. Foi possível também constatar uma queda nas produções a partir do ano de 2019, e um novo avanço em 2022.

Os estudos voltados para a recuperação de áreas degradadas vêm abordando temas relevantes, como o desenvolvido por Lima *et al.* (2021), que avaliaram a interação de insetos e aranhas com mudas de *Acácia mangium*, e identificou uma maior diversidade de formigas em mudas com mais ramos, assim, o aumento da população de artrópodes juntamente com o aumento da idade das mudas contribui positivamente no processo de recuperação do solo.

Liang *et al.* (2023) identificaram o TNI (Índice de Nicho do Terreno), índice de seca e os tipos de solo como sendo os principais elementos ambientais que influenciam na restauração da vegetação em áreas montanhosas frias e áridas, por meio da aplicação do GTWR (Modelo de Regressão Ponderada Geográfica e Temporal).

Outro estudo promissor foi realizado por Zhang *et al.* (2023), que avaliaram as respostas biogeoquímicas à recuperação sucessional de pastagens alpinas, por meio da estequiometria entre carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) no sistema contínuo solo-planta-micróbio. E identificaram que as diferentes respostas dos teores de C, N e P na planta-solo-micróbio levam a mudanças na relação estequiométrica C:N:P.

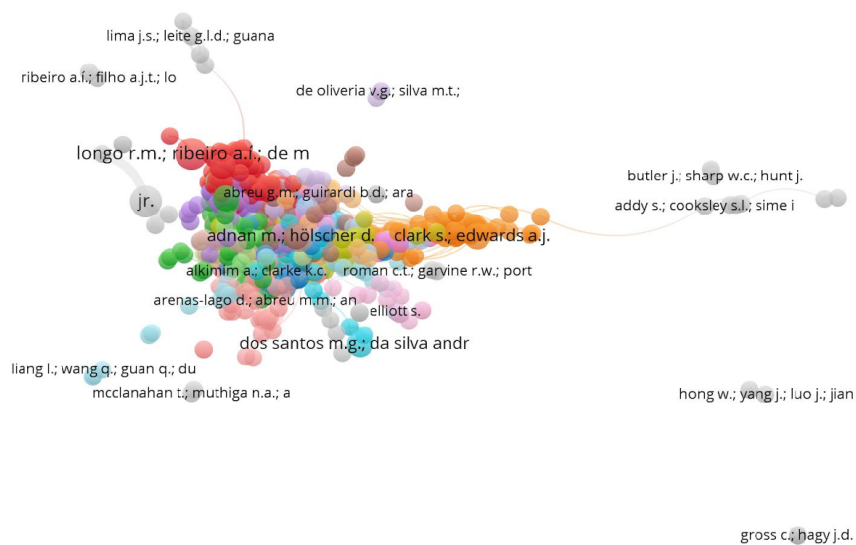
A multifuncionalidade do ecossistema, proporcionada pelo reflorestamento, foi avaliada por Yan *et al.* (2023) em uma área montanhosa do Planalto de Loess em três diferentes padrões de vegetação. No geral, o reflorestamento a longo prazo pode manter a multifuncionalidade do ecossistema com base na conservação da água, sequestro de carbono, ciclagem de nutrientes e produtividade.

O processo de recuperação de áreas degradadas varia de acordo com as características de cada local, assim, a realização dos estudos anteriormente exemplificados pode contribuir de maneira significativa, além de direcionar para a aplicação de novas técnicas de recuperação do solo. Como por exemplo, uma avaliação da interação de insetos em uma área de recuperação com braquiária associada a resposta dos teores de C, N e P.

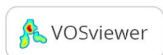
A quarta análise foi realizada nas duas bases de dados, na base da Scopus a ênfase foi dada para as dez últimas publicações (Tabela 1.1), e pela análise detalhada foi identificado que o estudo biológico constituiu a abordagem principal das pesquisas relacionadas com o tema recuperação de áreas degradadas. E na Web of Science a análise detalhada teve enfoque nos dez estudos mais citados, que abordaram o tema da utilização de espécies vegetais na recuperação do solo (Tabela 1.2). Os artigos mais citados foram publicados nas principais revistas dessa base de dados.

A última análise foi para compreender como os países e autores se organizaram em relação ao estudo da recuperação de áreas degradadas, foi realizada uma avaliação da rede de colaboração internacional baseada nos principais países (com no mínimo, uma publicação) e nos autores que mais publicam, considerando as coautorias. O mapeamento bibliométrico constatou 159 países e 25 clusters de cooperação, divididos em três grupos. O Brasil (o mais destacado no agrupamento) lidera em número de publicações, na sequência vem os EUA e China (Figura 1.5).

Figura 1.2 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.

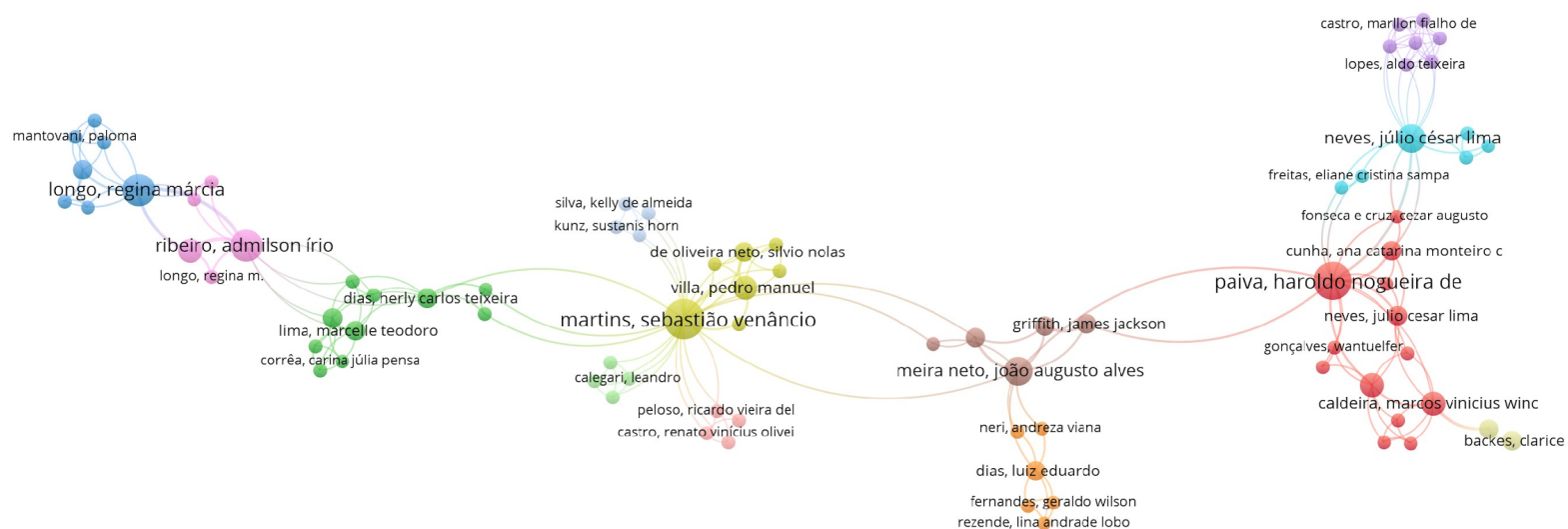


iii; gedir j.v.



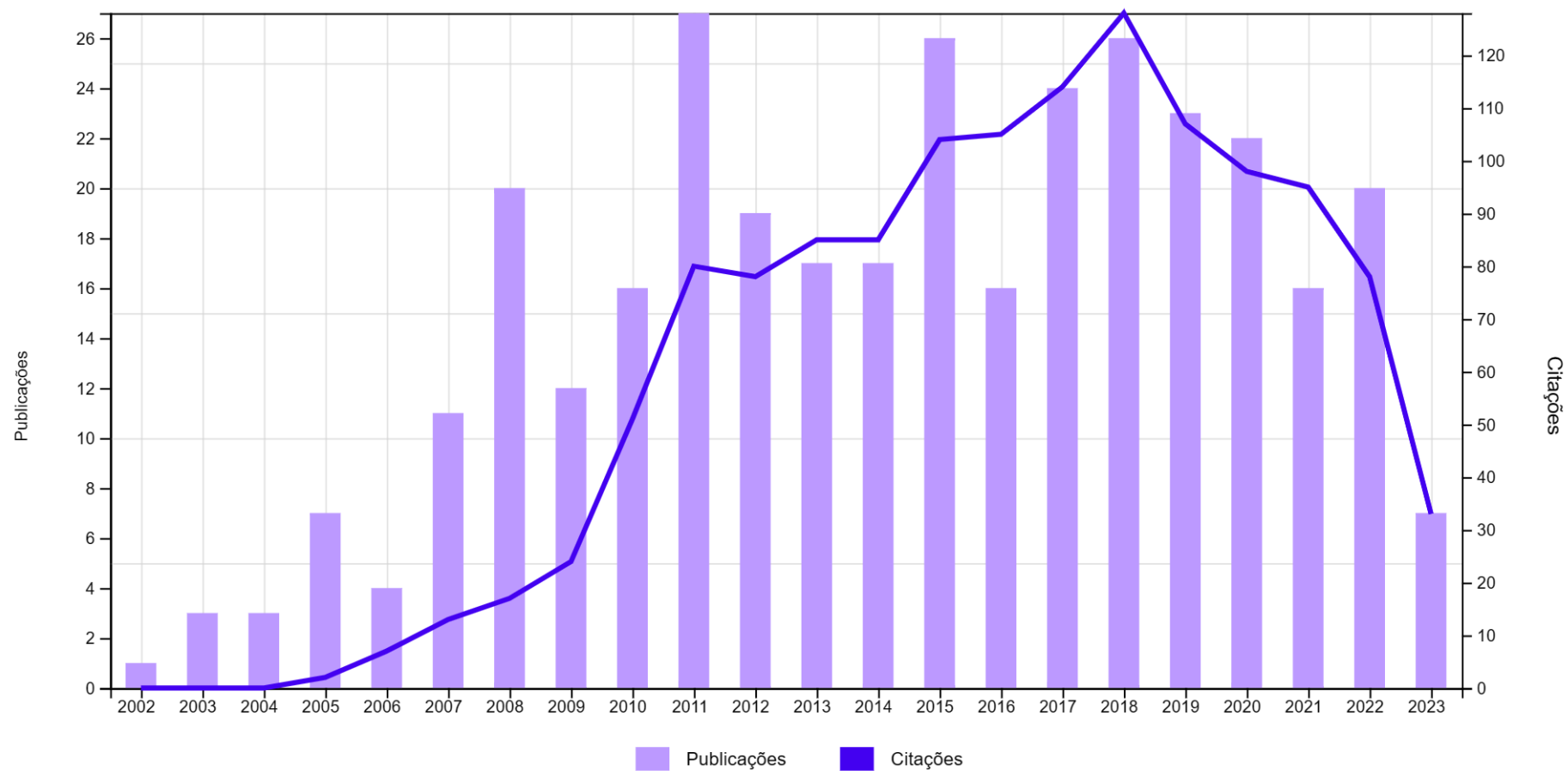
Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.3 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.4 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.



Fonte: Web of science (2023).

Tabela 1.1 - Dez últimas publicações.

	Título	Autores	Ano	Fonte
I	Insects and spiders on Acacia mangium (Fabaceae) saplings as bioindicators for the recovery of tropical degraded areas	Lima, J.S., Leite, G.L.D., Guanabens, P.F.S., Lemes, P.G., Zanuncio, J.C.	2023	Brazilian Journal of Biology
II	Accounting for forest condition in Europe based on an international statistical standard	Maes, J., Bruzón, A.G., Barredo, J.I., Rivero, I.M., Santos-Martín, F.	2023	Nature Communications
III	Reconstructing migratory network nodes to improve environmental management and conservation decisions: A case study of the common quail Coturnix coturnix as a biosensor	Sáez, D., Spina, F., Margalida, A., Volponi, S., Nadal, J.	2023	Science of the Total Environment
IV	Plant secondary succession and soil degradation in humid red beds areas, South China	Jin, Y., Xiang, Y., Liu, C., Zhao, B., Qi, S.	2023	Ecological Indicators
V	Metagenomic analysis of the microbial community at the Riutort oil shale mine (NE Spain): Potential applications in bioremediation and enhanced oil recovery	González-Toril, E., Permanyer, A., Gallego, J.R., Lorenzo, E., Aguilera, A.	2023	Fuel
VI	What follows follow? Assessing revegetation patterns on abandoned sugarcane land in Hawai'i	Farrant, D.N., Roberts, D.A., D'Antonio, C.M., Larsen, A.E.	2023	Agriculture, Ecosystems and Environment
VII	Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the arid and semi-arid regions of China	Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z., Stringer, L.C.	2023	Journal of Environmental Management
VIII	Acacia seedlings mangium (Fabaceae) as bioindicators for the recovery of degraded tropical areas	Lima, J.S., Leite, G.L.D., Guanabens, P.F.S., (...), Lemes, P.G., Zanuncio, J.C.	2023	Brazilian Journal of Biology
IX	Sexual and asexual propagation of Baccharis dracunculifolia DC., a Brazilian dioecious medicinal shrub	Tomazzoli, M.M., Do Amaral, W., Tomasi, J.C., (...), Zeviani, W.M., Deschamps, C.	2023	Acta Scientiarum - Agronomy
X	Recurrent heavy rains that result in degraded-upgraded phases in soil microbial networks that are reflected in soil functioning	Stamou, G.P., Monokrousos, N., Papapostolou, A., Papatheodorou, E.M.	2023	Soil Ecology Cards

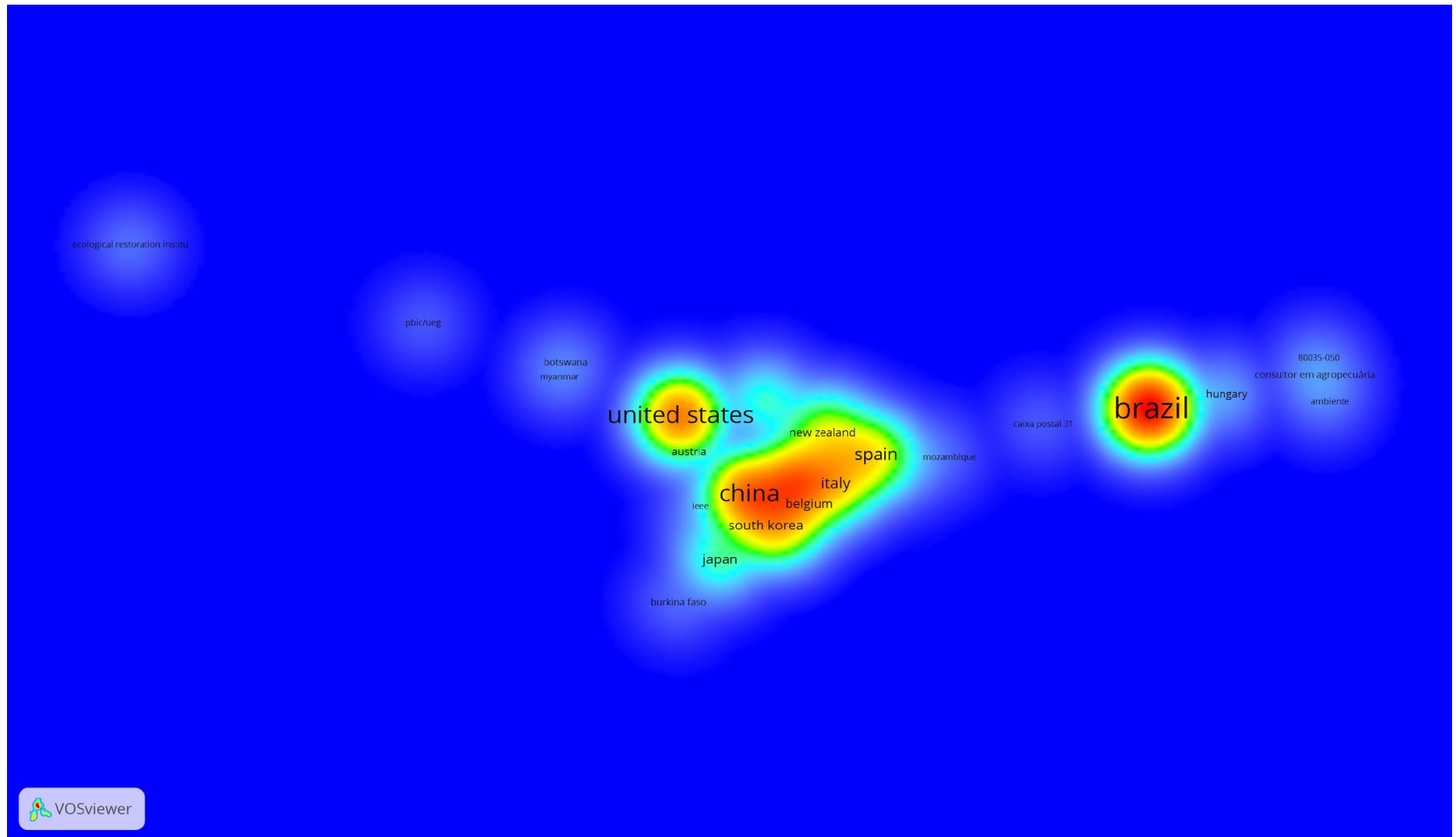
Fonte: Scopus (2023).

Tabela 1.2 - Dez periódicos mais citados.

Publicações

-
- Soil density and water infiltration as indicators of the physical quality of a dystrophic Red
Oxisol in recovery
- 1° Alves, Marlene Cristina ; Suzuki, Luis Gustavo Akihiro Sanches and Suzuki, Luiz Eduardo
Akiyoshi sandwiches
2007-08 |
Revista Brasileira de Ciência do Solo 31 (4), pp.617-625
-
- Recovery of a degraded soil with the application of green manures and sewage sludge
- 2° Kitamura, Aline Emy ; Alves, Marlene Cristina ; (...); Paz Gonzalez, Antonio
2008-02 |
Revista Brasileira de Ciência do Solo 32 (1), pp.405-416
-
- Seed size and water stress effects on seed germination and seedling vigor of faveira (
Clitoria fairchildiana RA Howard. - Fabaceae)
- 3° Silva, Breno Marques da Silva and and Carvalho, Nelson Moreira de
2008 |
Revista Brasileira de Sementes 30 (1), pp.55-65
-
- Use of green fertilizing in the recovery of soils degraded by mining in the amazon forest
- 4° Longo, Regina Márcia ; Ribeiro, Admilson Írio e Melo, Wanderley José de
2011 |
Bragantia 70 (1), pp.139-146
-
- SOIL FAUNA AS BIOINDICATOR OF RECOVERY OF DEGRADED AREAS IN THE
CAATINGA BIOME
- 5° LIMA, KHADIDJA DANTAS ROCHA DE; CHAMBER, RODRIGO; (...); RESENDE,
ALEXANDRE SILVA DE
2017-06 |
Revista Caatinga 30 (2), pp.401-411
-
- Phytoremediation of soils contaminated with picloram by Urochloa brizantha
- 6° Franco, Miguel Henrique Rosa ; França , André Cabral ; (...); Vargas, Guto Nascimento;
2014-12 |
Search Tropical Agriculture 44 (4), pp.460-467
-
- Recovery of soil physical properties by green management, liming, gypsum and pasture and
spontaneous native species¹
- 7° Santos Batista Bonini , Carolina dos e Alves, Marlene Cristina
2011-08 |
Revista Brasileira de Ciência do Solo 35 (4), pp.1397-1406
-
- Edaphic macrofauna as a bioindicator of the recovery of degraded soils in the Cerrado
- 8° Kitamura, Aline Emy ; Tavares, Rose Luiza Moraes ; (...); Siqueira, Diego Silva;
2020 |
Ciência Rural 50 (8) , p.e20190606
-
- ANTS FAUNA IN PERMANENT PRESERVATION AREAS OF HYDROELECTRIC PLANTS
- 9° Lutinski , Junir Antônio ; Guard , Carin ; (...); Garcia, Flavio Roberto Mello
2018-12 |
Science Forestry 28 (4) , pp.1741-1754
-
- Recovery of three toppings forestry mid - altitude tropical areas in Costa Rica: oligochaetes ,
litter and soil analysis
- 10° Pérez-Molina, Pastor Junior and Cordero Solórzano, Roberto A
2012-12 |
Revista de Biología Tropical 60 (4) , pp.1431-1443
Fonte: Web of Science (2023).
-

Figura 1.5 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.



1.3.2 Análise realizada com o termo “recuperação de área degradada” associado a “construção de hidrelétrica” ou “compactação do solo”

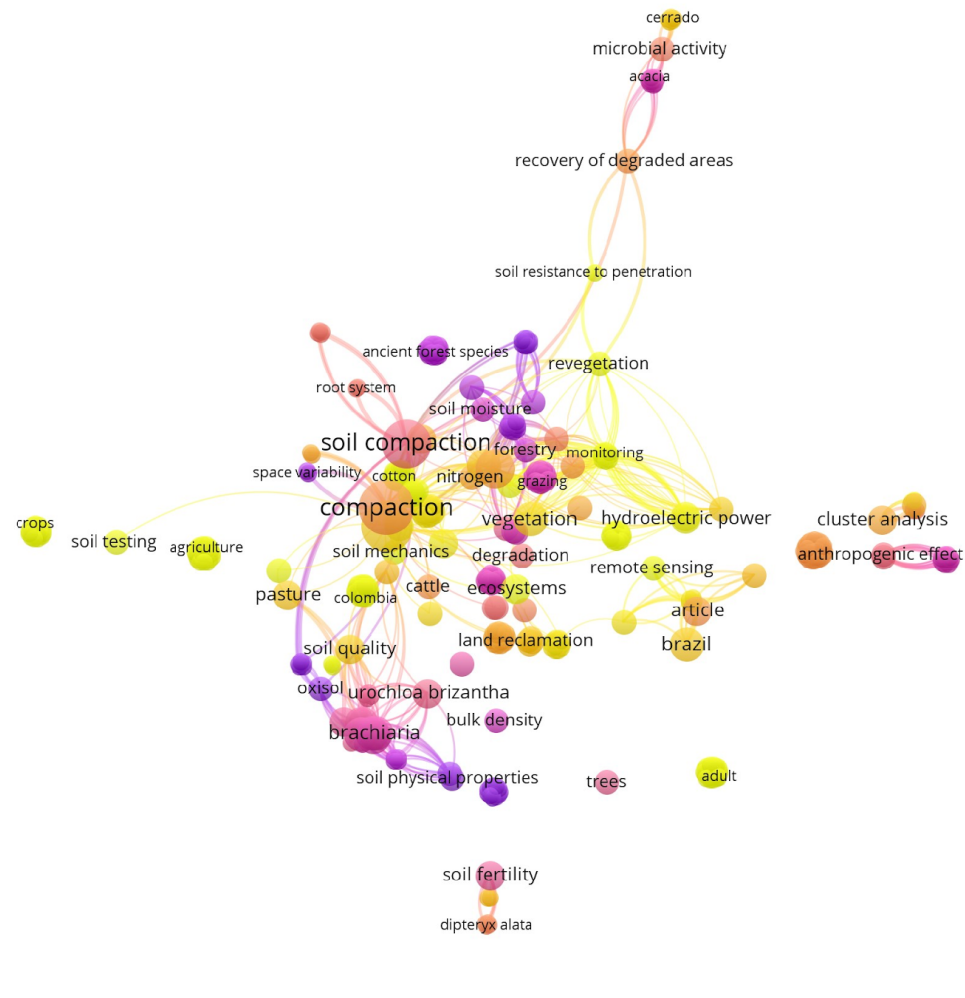
A pesquisa pela associação dos termos “recuperação de área degradada” com “construção de hidrelétrica” ou “compactação do solo” na base de dados Scopus retornou 41 documentos no período de 1991 a 2023, desses 37 são artigos e estão distribuídos, em maior número, entre cinco revistas: Revista Brasileira de Ciência do Solo, Forest Science, Agronomic Science Magazine, Geoderm e Soil Research and Soil Preparation. Dos artigos publicados 15 foram produzidos por pesquisadores da Unesp e 6 pela Universidade Estadual de Campinas, sendo que 26 deles foram publicados no Brasil.

Na base de dados Web of Science, a pesquisa retornou 911 documentos no período de 2002 a 2023, desses 892 são artigos e estão distribuídos, em maior número, entre três revistas: Revista Brasileira de Ciência do Solo, Multidisciplinary Agriculture, Engenharia Agrícola. Dos artigos publicados 98 foram produzidos por pesquisadores da Universidade Federal de Santa Maria e 91 pela Unesp, sendo 579 deles foram publicados no Brasil.

A primeira visualização e análise realizada foi com o método de palavra-chave, utilizando os dados obtidos na base de dados Scopus e importados para o software de visualização VOSViewer. O mapa obtido é apresentado na Figura 1.6.

O mapa de co-ocorrência de palavras sugere a existência de 3 conglomerados de termos. O primeiro mais destacado dos clusters (em laranja) está centrado em torno da compactação do solo. Já o cluster segundo em termos de destaque (em amarelo) está centrado em torno da qualidade do solo. Por fim, último cluster formado está centrado no tema espécies vegetais representada pela braquiária (em rosa) e vem se destacando a partir de 2010. Outros temas ainda são pouco estudados, mas devem ser abordados em trabalhos futuros, como o sistema agrícola integrado, avaliação visual do solo e manejo florestal de vários andares.

Figura 1.6 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

A segunda visualização e análise realizada foram o mapeamento bibliométrico dos principais autores nas duas bases de dados consultadas. A base da Scopus (Figura 1.7) pela contagem fracionária revelou a existência de 40 autores, divididos em 4 grupos de pesquisa. Consideramos que os autores deveriam ter pelo menos 1 documento publicado, se destacaram na análise os seguintes autores: Araújo, A. O.; Mendonça, L. A. R.; Alves, M. C.; Nascimento, V. e Bonini, C. S. B. Na base da Web of Science (Figura 1.8) foi avaliado a co-autoria e identificado 2785 autores, divididos em 6 grupos de pesquisa, e se destacaram nessa análise Reichert, J. M.; Dias Junior, M. S.; Souza, Z. M. e Tormena, C. A.

A terceira análise realizada foi na base de dados da Web of Science com o número de citações e publicações ao longo do tempo (Figura 1.9), do total de 911 publicações reportou 5360 citações, com média de 5,88 citações por artigo. E o indicador de desempenho da produção científica dos autores (Índice h) foi igual a 30. Observa-se um avanço da pesquisa sobre a temática, principalmente até o ano de 2011 no qual foram identificadas 64 publicações. Foi possível também constatar uma queda nas produções nos anos de 2019, 2021 e 2022.

Os estudos dos impactos ambientais sobre o solo gerados pela construção de hidrelétricas vêm ganhando destaque nos últimos anos. Como o desenvolvido por Wan *et al.* (2023), que identificaram o tempo e a magnitude das mudanças abruptas, por meio de um método integrado e baseado em sensoriamento remoto (NDVI) e indicaram que os tempos de grandes mudanças abruptas de NDVI foram consistentes com o tempo de construção e operação das usinas hidrelétricas e o tempo de mudança climática.

Lopes, Marciano e Faustino (2021) avaliaram os atributos hidrodinâmicos e a hidrofobicidade potencial (repelência do solo a água) de um solo em recuperação com leguminosas. A resposta hidrodinâmica do solo foi o oposto ao esperado, uma vez que, com o aumento da condutividade apresentou capacidade de absorção apesar da maior compactação do solo. Dessa maneira, os níveis potenciais de hidrofobicidade afetam os atributos hidrodinâmicos, e a revegetação com espécies de leguminosas leva à recuperação das condições naturais do solo.

Uma investigação do fluxo gênico centrado na dispersão de pólen e sementes, de uma população regenerante da *Astronium fraxinifolium* em área degradada oriunda da construção de uma hidrelétrica, foi desenvolvido por Manoel *et al.* (2021) e demonstrou que as árvores mais próximas contribuíram com pólen e

sementes para a recuperação da área degradada, indicando isolamento espacial reprodutivo entre as populações amostradas devido ao represamento do rio.

A utilização de um sistema silvipastoril na restauração da qualidade física de pastagens degradadas se mostrou eficiente no estado de Caquetá na Colômbia (POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2020). Faustino e Marciano (2021) também avaliaram a recuperação de uma pastagem degradada no estado do Rio de Janeiro, por meio do indicador do intervalo hídrico ótimo (IHO) na revegetação com leguminosas, e identificou um IHO menor que a água disponível, em decorrência dos valores de resistência à penetração encontrados serem superiores ao limite crítico de 3,0 MPa.

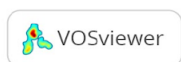
Fardin *et al.* (2021) evidenciaram que a incorporação de resíduos oriundos de macrófitas aquáticas e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar juntamente com o plantio de espécies arbóreas do Cerrado são eficientes na recuperação ecológica de áreas degradadas para construção de hidrelétrica em Selvíria/MS. No mesmo local de estudo, Kitamura *et al.* (2020) avaliaram a macrofauna edáfica usando diferentes tipos de cobertura vegetal e constituídos por seis tratamentos, podendo identificar o aumento da população de macrofauna do solo em aproximadamente 4 a 6 vezes mais com a aplicação do tratamento de *Astronium fraxinifolium* + *Urochloa decumbens*+ lodo de esgoto, após três anos de avaliação.

O processo de recuperação de áreas degradadas oriundas da construção de hidrelétricas varia de acordo com as características de cada local, assim, a realização dos estudos anteriormente exemplificados pode contribuir de maneira significativa, além de direcionar para a aplicação de novas técnicas de recuperação do solo. Como por exemplo, uma implantação de sistema silvipastoril ou a avaliação da contribuição da dispersão do pólen na recuperação das espécies do solo degradado.

A quarta análise foi realizada nas duas bases de dados, na base da Scopus a ênfase foi dada para as dez ultimas publicações (Tabela 1.3), e pela análise detalhada foi identificado que o estudo de sistemas florestais como indicadores de recuperação do solo constituiu a abordagem principal das pesquisas relacionadas com a associação dos termos “recuperação de área degradada” com “construção de hidrelétrica” ou “compactação do solo”. E na Web of Science a análise detalhada teve enfoque nos dez estudos mais citados, que abordaram o tema da qualidade física do solo em sistema de integração lavoura-pecuária (Tabela 1.4). A maioria dos artigos mais citados foram publicados Revistas Brasileira de Ciência do Solo.

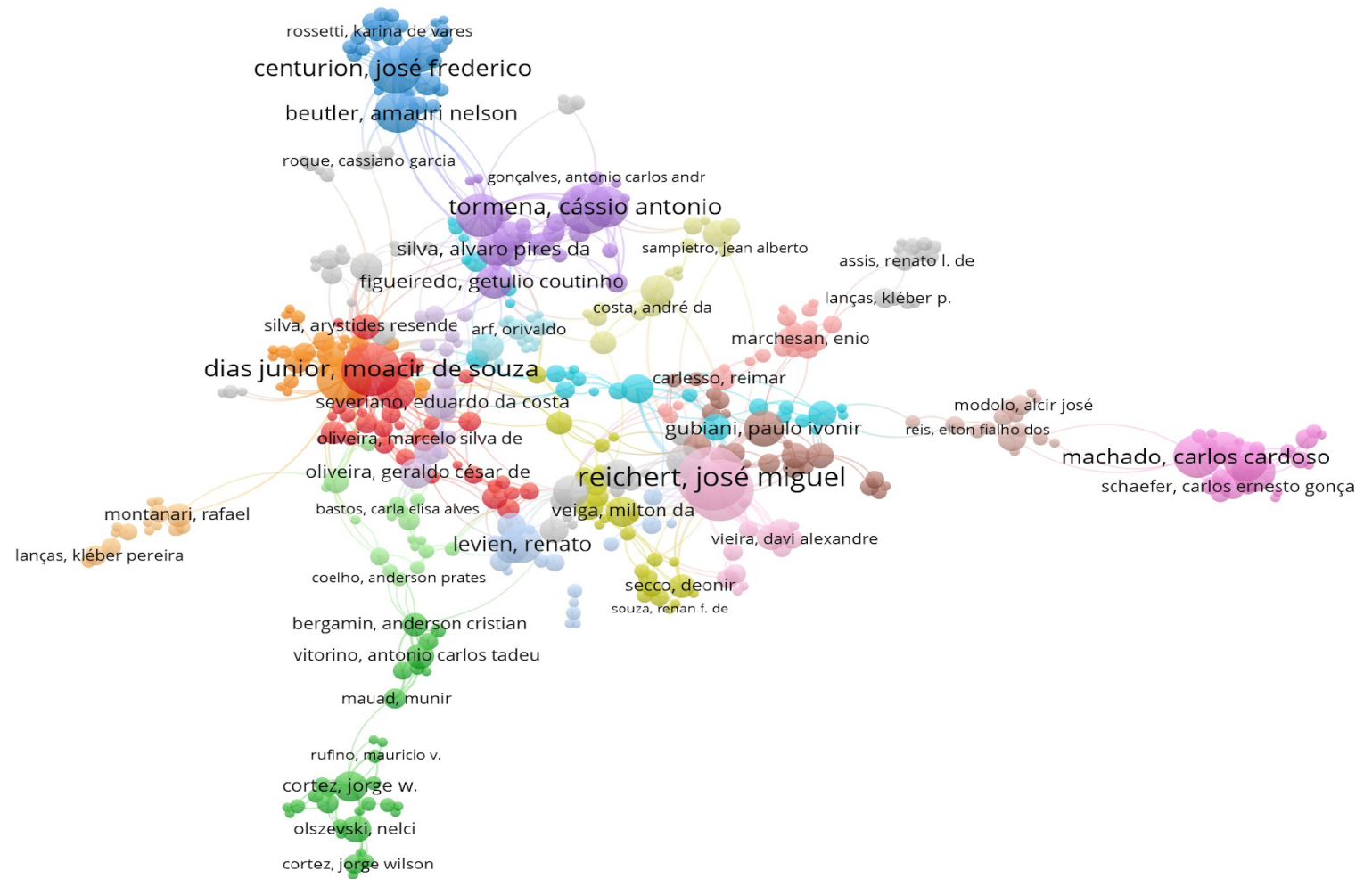
A última análise foi para compreender como os países e autores se organizaram em relação ao estudo da recuperação de áreas degradadas originadas na construção de hidrelétricas, foi realizada uma avaliação da rede de colaboração internacional baseada nos principais países (com no mínimo, 1 publicação) e nos autores que mais publicam, considerando as coautorias. O mapeamento bibliométrico constatou 18 países e 3 clusters de cooperação, divididos em três grupos. A Malásia e a Austrália apresentaram o mesmo número de publicações, na sequência vem a França (Figura 1.10).

Figura 1.7 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.8 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.9 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.



Fonte: Web of science (2023).

Tabela 1.3 - Dez últimas publicações.

	Título	Autores	Ano	Fonte
I	Hyrceanian mixed forests : influence on C and N pools and enzymatic activities	Ramineh , A.; , Oliveira, M.; Etemad , V.; , Oliveira, M.; Ribeiro, R.;	2023	Forests
II	An integrated method to identify and assess the impact of hydropower development on the Earth's ecosystem	Wan, H., Xie, Y., Li, B., Cai, Y., Yang, Z.	2023	Review of the Environmental Impact Assessment
III	A Narrative Review of the Impact of Forest Rehabilitation Programs on Soil Quality in Peninsular Malaysia	Karam, D.S., Ibrahim, Z., Rani, R., (...), Zulperi, D., Abdu, A.	2022	Malaysian Journal of Soil Science
IV	Hydrodynamic attributes and potential hydrophobicity of a Typical Hapludult soil under secondary Atlantic Forest, degraded pastures and legumes, in Southeast Brazil	Lopes, P.G.D.N., Marciano, C.R., Faustino, L.L.	2021	Regional Geoderm
V	Landscape barriers to pollen and seed flow in the tropical tree <i>Astronium dioica fraxinifolium</i> in Brazilian savanna	Manoel, R.O., Rossini, B.C., Cornacini, M.R., (...), Sebbenn, A.M., Marino, C.L.	2021	PLOS ONE
VI	Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in the Colombian Amazon	Polanía-Hincapié, K.L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M.R., (...), Ortiz-Morea, F.A., Silva-Olaya, A.M.	2021	Geoderm
VII	Less limiting water range and critical bulk density values as indicators of soil recovery under forest and pasture systems	Faustino, L.L., Marciano, C.R.	2021	Forest Science
VIII	Ecological restoration of exposed subsoil conditioned with waste in the Cerrado	Fardin, F.H., Maltoni, K.L., Boni, T.S., Faria, G.A., Rezende, A.A.	2021	Science Forestalis /Forestry Sciences
IX	Compression and rebound characteristics of southern Greenland agricultural sandy pasture soils	Pesch, C., Lamandé, M., de Jonge, L.W., (...), Greve, M.H., Moldrup, P.	2020	Geoderm
X	Design and Experiments of Guide Chain Rake Surface Residual Film Recycling Machine	Xie, J., Yang, Y., Cao, S., (...), Zhou, Y., Ma, W.	2020	nongye gongcheng Xuebao /Transactions of China Society of Agricultural Engineering

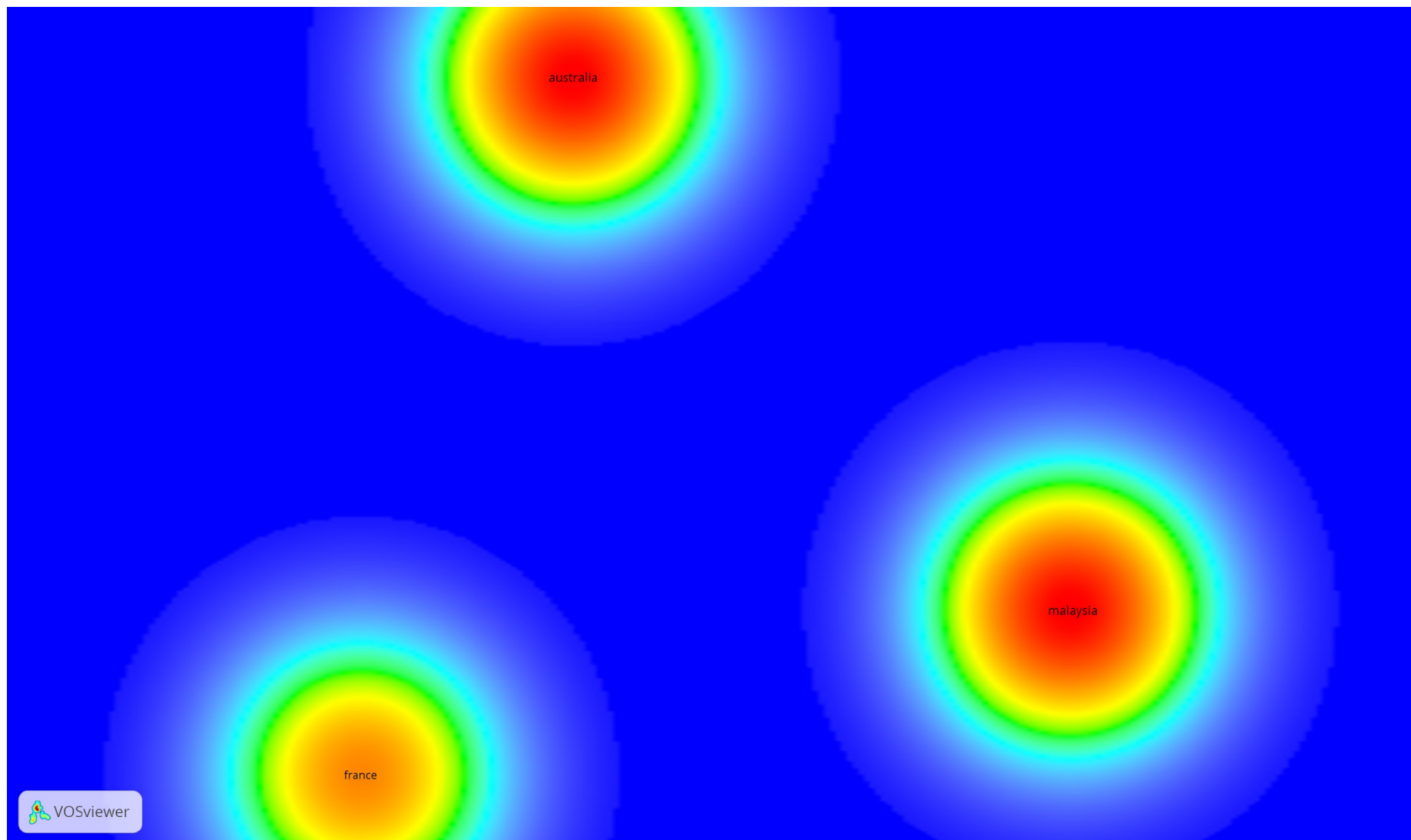
Fonte: Scopus (2023).

Tabela 1.4 - Dez periódicos mais citados.

Publicações	
1°	Soil physical attributes in a crop-livestock integration system under no-tillage Lanzanova , Enivar Mastrangelo ; Nicoloso , Rodrigo da Silveira ; (...); Reinert, Dalvan José 2007-10 Revista Brasileira de Ciência do Solo 31 (5) , pp.1131-1140
2°	Plant residues on the surface and organic carbon in the soil and their relationships with the maximum density obtained in the proctor test Braidá , João Alfredo ; Reichert, Jose Miguel ; (...); Reinert, Dalvan José 2006-08 Revista Brasileira de Ciência do Solo 30 (4) , pp.605-614
3°	Soil physical properties under conventional tillage and no-tillage in crop rotation and succession, compared to native grassland Bertol , I.; ; Oliveira, JA; ; (...); Zoldan Junior, WA; 2004-02 Revista Brasileira de Ciência do Solo 28 (1) , pp.155-163
4°	Temporal variation of the optimum water range of a dystroferric red oxisol under no-tillage systems Tormena , Cássio Antônio ; Araújo, Marcelo Alessandro ; (...); Costa, Joaquim Mariano da 2007-04 Revista Brasileira de Ciência do Solo 31 (2) , pp.211-219
5°	Physical properties of a cultivated dystrophic Red Latosol under native forest Araujo, MA; ; Tormena , CA; and Silva, AP 2004-04 Revista Brasileira de Ciência do Solo 28 (2) , pp.337-345
6°	Soil physical quality on common bean crop productivity in an Argisol Collares , Gilberto Loguércio ; Reinert, Dalvan José ; (...); Kaiser, Douglas Rodrigo 2006-11 Pesquisa Agropecuária Brasileira 41 (11) , pp.1663-1674
7°	Density, porosity and resistance to penetration in Oxisol cultivated under different tillage systems Tormena , Cássio Antônio ; Barbosa, Mauro Cezar ; (...); Gonçalves Antonio Carlos Andrade 2002-12 Scientia Agrícola 59 (4) , pp.795-801
8°	Crop-livestock integration: intensification of the use of agricultural areas Balbinot Júnior, Alvadi Antônio ; Moraes, Aníbal de ; (...); Dieckow , Jeferson 2009-09 Ciência Rural 39 (6) , pp.1925-1933
9°	Soil bulk density critical limits for root growth of cover crops in red argisol Reinert, Dalvan José ; Albuquerque, Jackson Adriano ; (...); Andrada , Martín María Cubilla 2008-10 Revista Brasileira de Ciência do Solo 32 (5) , pp.1805-1816
10°	Soybean productivity and physical properties of an Oxisol submitted to management and compaction systems Secco, D.; ; Reinert, JD; ; (...); Ros, CO da 2004-10 Revista Brasileira de Ciência do Solo 28 (5) , pp.797-804

Fonte: Web of Science (2023).

Figura 1.10 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

1.3.3 Análise realizada com o termo “recuperação de área degradada” associado a “espécies de adubação verde” ou “bioindicador de recuperação do solo”

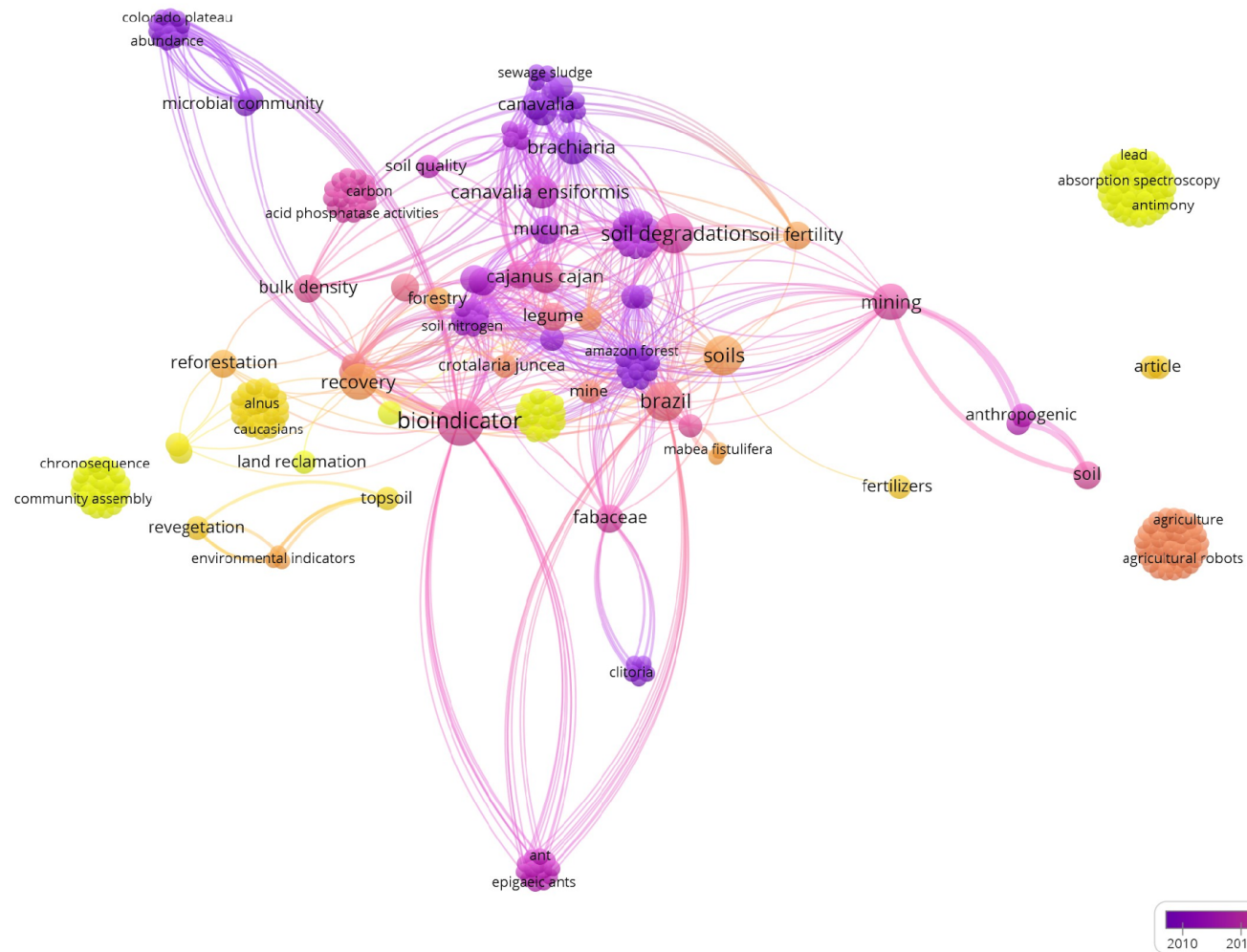
A pesquisa pela associação dos termos “recuperação de área degradada” com “espécies de adubação verde” ou “bioindicador de recuperação do solo” na base de dados Scopus retornou 21 documentos no período de 2006 a 2021, sendo todos artigos estando distribuídos, em maior número, entre cinco revistas: Revista Brasileira de Ciência do Solo e Bragança. Dos artigos publicados 9 foram produzidos por pesquisadores da Unesp e 2 pela em outras universidades, sendo que 15 deles foram publicados no Brasil.

Na base de dados Web of Science, a pesquisa retornou 13 documentos no período de 2007 a 2023, desses 12 são artigos e estão distribuídos, em maior número na Revista Brasileira de Ciência do Solo. Dos artigos publicados 6 foram produzidos por pesquisadores da Unesp e 2 pela Universidade Federal de Viçosa, sendo 10 deles publicados no Brasil.

A primeira visualização e análise realizada foi com o método de palavra-chave, utilizando os dados obtidos na base de dados Scopus e importados para o software de visualização VOSViewer. O mapa obtido é apresentado na Figura 1.11.

O mapa de co-ocorrência de palavras sugere a existência de 3 conglomerados de termos. O primeiro mais destacado dos clusters (em rosa) está centrado em torno da comunidade microbiana como bioindicador. Já o cluster segundo em termos de destaque (em roxo) está centrado em torno da degradação do solo associado ao nome de espécies de adubação verde, como: mucuna, braquiária, Cajanus cajan (guandu) e Canavalia ensiformis (feijão-de-porco). O terceiro cluster (em amarelo) está centrado em torno do reflorestamento, e vem se destacando a partir de 2018. Outros temas ainda são pouco estudados, mas devem ser abordados em trabalhos futuros, como a Mabea fistulifera (mamoninha), Carpinus (gênero botânico pertencente à família Betulaceae) e indicadores ambientais.

Figura 1.11 - Rede de co-ocorrência de termos da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

A segunda visualização e análise realizada foi com o mapeamento bibliométrico dos principais autores nas duas bases de dados consultadas. A base da Scopus (Figura 1.12) pela contagem fracionária revelou a existência de 19 autores, divididos em 4 grupos de pesquisa. Consideramos que os autores deveriam ter pelo menos 1 documento publicado, se destacaram na análise os seguintes autores: Longo, R. M.; Calinoiu, I.; Alves, M. C. e Kitamura, A. E. Na base da Web of Science (Figura 13) foi avaliado a co-autoria e identificado 43 autores, divididos em 2 grupos de pesquisa, e se destacaram nessa análise Alves, M. A. e Kitamura, A. E.

A terceira análise realizada foi na base de dados da Web of Science com o número de citações e publicações ao longo do tempo (Figura 1.14), do total de 13 publicações reportou 81 citações, com média de 6,23 citações por artigo. E o indicador de desempenho da produção científica dos autores (Índice h) foi igual a 4. Observa-se um avanço da pesquisa sobre a temática, principalmente nos anos de 2008, 2011 e 2018, sendo identificado até 13 publicações. Nos anos de 2009, 2010, 2013, 2015, 2016, 2019 e 2022 ocorreram algumas lacunas, ou seja, não houve novas publicações relacionadas ao tema pesquisado. Entretanto, em 2023 foi retomada as publicações e retornaram 3 documentos.

O estudo da aplicação de espécies de adubação verde na recuperação de áreas degradadas vem ganhando destaque nos últimos anos. Como o desenvolvido por Fonseca, Martins e Villa (2023) que utilizou espécies de *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* e *Stylosanthes guianensis* para avaliar a recuperação de solo degradado pela mineração, as quais se mostraram eficientes em promover rápida cobertura vegetal e aumento nos teores de matéria orgânica e nitrogênio total do solo.

Rocha *et al.* (2020) também estudaram a recuperação de uma área degradada pela mineração no Estado do Pará, por meio da utilização de quatro espécies de leguminosas: *Cajanus cajan* (L.), *Canavalia ensiformis* (L.) DC, *Crotalaria juncea* (L.) e *Mucuna pruriens* (L.), implantadas sobre três condições de solo: solo exposto, solo superficial e hidrogel. E identificaram que as espécies *C. ensiformis* (L.) DC e *M. pruriens* (L.) apresentam melhor desenvolvimento quando cultivadas em solos com deposição superficial do solo como substrato reconformado.

A complexidade estrutural de um habitat pode ser descrita pelo uso da fauna de formigas como bioindicador do estado de conservação ambiental. Lutinski *et al.*

(2018) apresentaram o potencial das formigas na avaliação do processo de regeneração de uma área de preservação permanente de usina hidrelétrica.

A seleção de espécies de adubação verde a serem utilizadas no processo de recuperação de áreas degradadas varia de acordo com as características de cada local, assim, a realização dos estudos anteriormente exemplificados pode contribuir de maneira significativa, além de direcionar para a aplicação de novas técnicas e escolha de bioindicadores de recuperação do solo.

A quarta análise foi realizada nas duas bases de dados, na base da Scopus a ênfase foi dada para as dez ultimas publicações (Tabela 1.5), e pela análise detalhada foi identificado que o estudo da fauna como bioindicador de recuperação do solo constituiu a abordagem principal das pesquisas relacionadas com a associação dos termos “recuperação de área degradada” com "espécies de adubação verde" ou "bioindicador de recuperação do solo". E na Web of Science a análise detalhada teve enfoque nos dez estudos mais citados, que abordaram o tema da utilização de adubação verde na recuperação de solos degradados (Tabela 1.6). Da maioria dos artigos mais citados, alguns foram publicados nas principais revistas dessa base de dados, e também realizam a publicação em outras revistas.

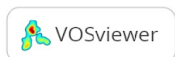
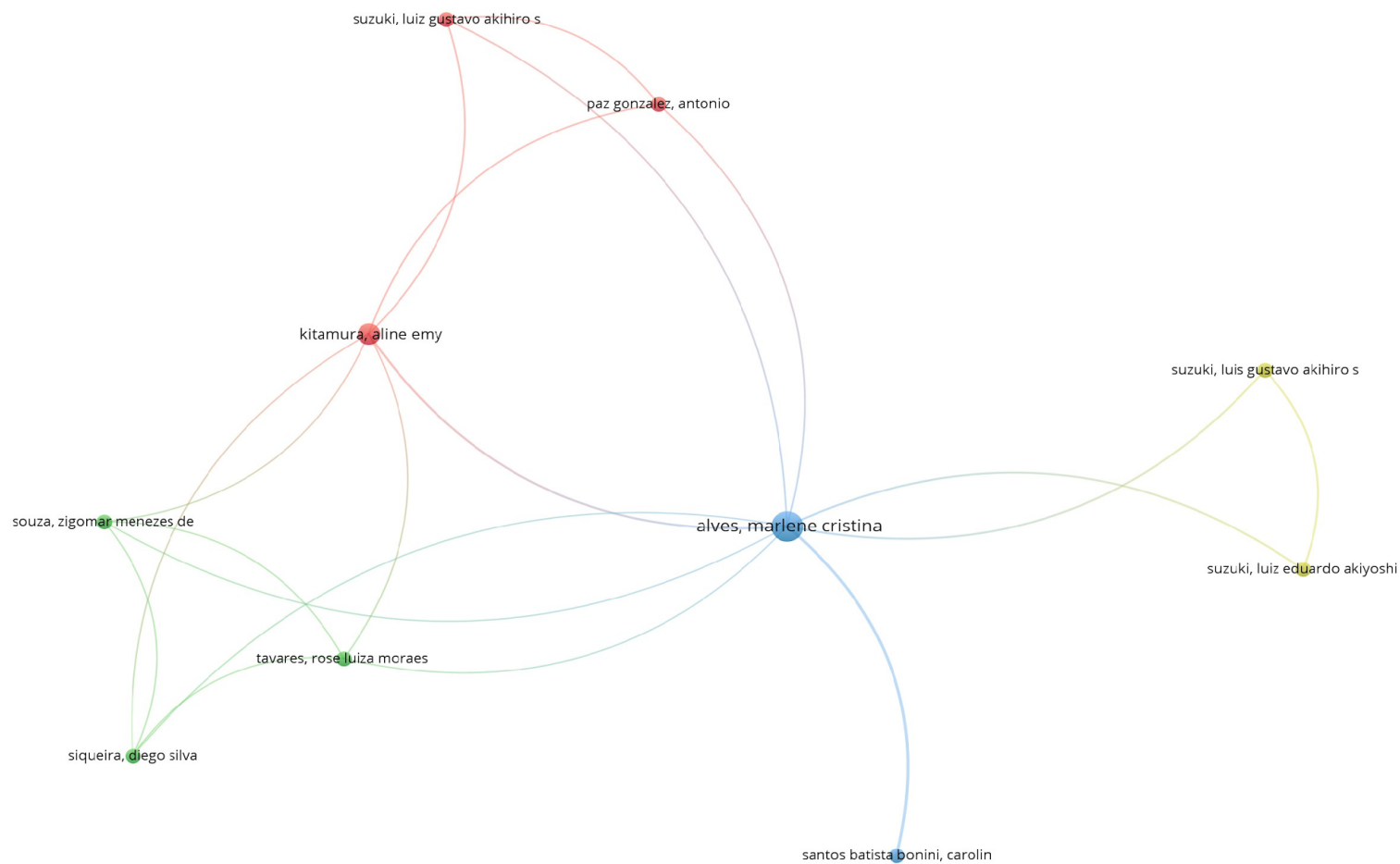
A última análise foi para compreender como os países e autores se organizaram em relação ao estudo da recuperação de áreas degradadas com a utilização de espécies de adubação verde, foi realizada uma avaliação da rede de colaboração internacional baseada nos principais países (com no mínimo, 1 publicação) e nos autores que mais publicam, considerando as coautorias. O mapeamento bibliométrico constatou 11 países e 2 clusters de cooperação, divididos em quatro grupos. O Brasil lidera com o maior número de publicações, na sequência vem a Espanha (Figura 1.15).

Figura 1.12 - Mapa de visualização de autores da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.13 - Mapa de visualização de autores da base Web of science.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 1.14 - Número de citações e publicações ao longo do tempo.



Fonte: Web of science (2023).

Tabela 1.5 - Dez últimas publicações.

	Título	Autores	Ano	Fonte
I	Green manure as an alternative for soil recovery in a bauxite mining environment in southeastern Brazil	da Silva Fonseca, W.; Martins, Sv, Vila, PM	2023	Forest and Environment
II	Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of soils degraded by mining in Brazil	Santos, R.P., Tubino, R.	2021	Advances in Resources, Conservation and Recycling
III	Effects of planting leguminous species and soil conditions on the recovery of a sand and pebble mining area	de Souza Rocha, R., Monteiro, V.F., de Abreu, L.C.P.C., Fernandes, A.P.D., dos Santos, C.R.C.	2021	Land Degradation and Development
IV	Plant characteristics as recovery indicators of recovered wells in forest areas: slow but directional succession trajectory	Azerbainha, E.T., Santala, K., McIntosh, A.C.S., Aubin, I.	2020	Ecology and Forest Management
V	Soil macrofauna as a bioindicator for the recovery of degraded cerrado soil	Kitamura, A.E., Tavares, R.L.M., Alves, M.C., de Souza, Z.M., Siqueira, D.S.	2020	Rural Science
VI	Soil physical-chemical and biological indicators to evaluate compacted soil restoration after reforestation	Jourgholami, M., Ghassemi, T., Labelle, E.R.	2019	Ecological Indicators
VII	Soil fauna: Bioindicator of soil recovery in the Brazilian cerrado	Giácomo, R.G., De Souza, R.C., Alves, M.C., (...), De Arruda, O.G., González, A.P.	2017	Brazilian Journal of Agricultural Sciences
VIII	Soil fauna as a bioindicator of recovery of degraded areas in the caatinga biome	de Lima, K.D.R., Camara, R., Chaer, G.M., Pereira, M.G., de Resende, A.S.	2017	Caatinga Magazine
IX	Effect of post-treatment conditions on the inactivation of helminth eggs (<i>Ascaris suum</i>) after the composting process	Darimani, H.S., Ito, R., Maiga, Y., (...), Funamizu, N., Maiga, A.H.	2016	Environmental Technology (UK)
X	Microbiological indicators of soil quality in a riparian forest recovery gradient	Vasconcellos, R.L.F., Bonfim, J.A., Andreote, F.D., (...), Baretta, D., Cardoso, E.J.B.N.	2013	Ecological Engineering

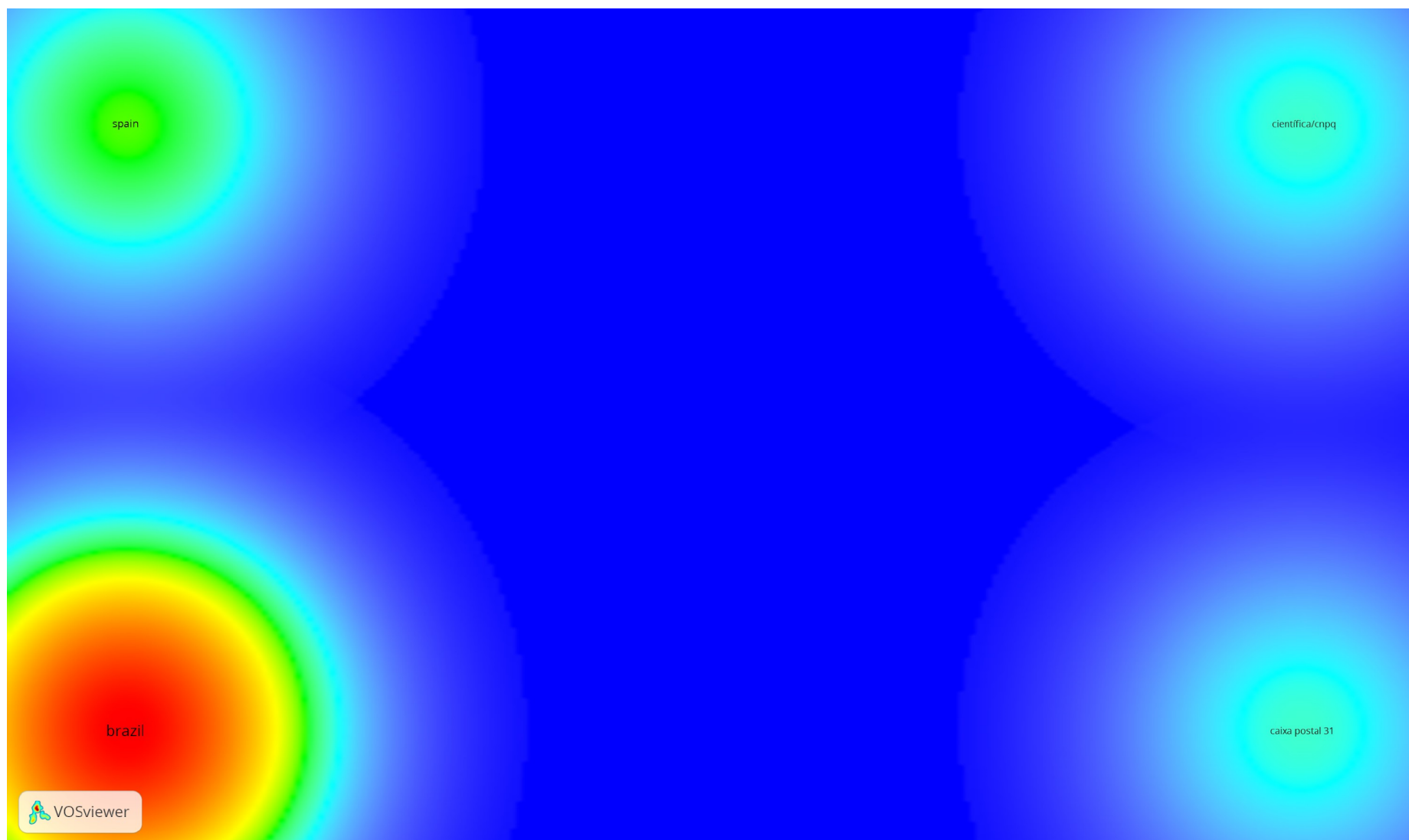
Fonte: Scopus (2023).

Tabela 1.6 - Dez periódicos mais citados.

Publicações	
1°	Aggregation and carbon stock in an argisol submitted to different agricultural management practices Vezzani , Fabiane Machado and Mielniczuk , João 2011-02 Revista Brasileira de Ciência do Solo 35 (1) , pp.213-223
2°	Desiccation tolerance and storage of <i>Caesalpinia echinata</i> Lam. (pau-brasil), species from the Atlantic Forest BARBEDO, CLÁUDIO J.; ; BILIA, DENISE AC and FIGUEIREDO-RIBEIRO, RITA DE CÁSSIA L. 2002-12 Revista Brasileira de Ciência do Solo 25 (4) , pp.431-439
3°	Effect of different levels of radiation on the initial growth and photosynthesis of <i>Croton urucurana</i> Baill plants. in the southeastern region of Brazil Alvarenga, Amauri Alves de ; Castro, Evaristo Mauro de ; (...); Magalhães , Marcelo Murad. 2003-02 Revista Árvore 27 (1) , pp.53-57
4°	Soil density and water infiltration as indicators of the physical quality of a dystrophic Red Oxisol in recovery Alves, Marlene Cristina ; Suzuki, Luis Gustavo Akihiro Sanches and Suzuki, Luiz Eduardo Akiyoshi sandwiches 2007-08 Revista Brasileira de Ciência do Solo 31 (4) , pp.617-625
5°	Morphological changes and biomass allocation in young plants of forest species under different shading conditions Almeida, Silvia Mara Zanela ; Soares, Angela Maria ; (...); Gajego , Evandro bordignon 2005-02 Ciência Rural 35 (1) , pp.62-68
6°	Recovery of a degraded soil with the application of green manures and sewage sludge Kitamura, Aline Emy ; Alves, Marlene Cristina ; (...); Paz Gonzalez, Antonio 2008-02 Revista Brasileira de Ciência do Solo 32 (1) , pp.405-416
7°	MINI-CUTTINGS OF <i>Sapium glandulatum</i> (Vell.) PAX WITH THE USE OF INDOL BUTYRIC ACID AND NAPHTHALENE ACETIC ACID Ferreira, Barbara Guerreira Alpande ; Zuffellato-Ribas , Kátia Cristina ; (...); Nogueira, Antonio Carlos. 2010-01 Science Forestry 20 (1) , pp.19-31
8°	Different substrates for the production of <i>Sesbania virgata</i> seedlings Delarmelina , Guilherme Macedo ; Caldeira , Marcos Vinicius Winckler ; (...); Rocha, Rafael Luiz Frinhani 2014-06 Forest and Environment 21 (2) , pp.224-233
9°	Gas exchange, leaf characteristics and growth of young plants of <i>Cupania vernalis</i> Camb. Lima Júnior, Érico de Castro ; Alvarenga, Amauri Alves de ; (...); Oliveira, Hilton Morbeck de 2005-10 Ciência Rural 35 (5) , pp.1092-1097

-
- Composition of the seed bank of a secondary semi-deciduous forest considering its
potential use for environmental recovery
- 10°** Braga, Antonio Jorge Tourinho ; Griffith, James Jackson ; (...); Meira Neto, Joao Augusto
Alves;
2008-12 |
Revista Árvore 32 (6) , pp.1089-1098
-
- Fonte: Web of Science (2023).

Figura 1.15 - Mapa de visualização de colaboração dos países da base Scopus.



Fonte: Próprio autor (2023).

1.4. Conclusão

O estudo bibliométrico da produção científica internacional sobre a temática Recuperação de áreas degradadas em associação com a construção de hidrelétricas ou a utilização de espécies de adubação verde possibilitou o conhecimento de dados como quantidade de publicações, periódicos mais citados, país com autores que mais publicam, além de analisar, via técnicas relacionais, os mapas de relações de coautoria entre autores.

Em relação aos conglomerados semânticos formados acerca do tema central, o Brasil e seus autores ocuparam posição de destaque na produção internacional investigada. A Unesp é a organização mais consolidada neste tema de pesquisa, seguida da Universidade Federal de Viçosa.

As publicações de Alves, Kitamura, Martins, Paiva e Reichert são particularmente importantes, tendo aparecido constantemente nas análises realizadas, sendo os cinco importantes autores da área.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **PUBVET**, Londrina, v. 11, n. 10, p. 1036-1045, out. 2017.
- FARDIN, F. H.; MALTONI, K. L.; BONI, T. S.; FARIA, G. A.; REZENDE, A. A. Restauração ecológica de subsolo exposto condicionado com resíduos no Cerrado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 130, p. 1-13, 2021.
- FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Intervalo hídrico ótimo e valores críticos de densidade como indicadores de recuperação de um solo sob sistemas florestais e pasto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021.
- FONSECA, W. S.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M. Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 30, n. 1, 2023.
- GAO, S. J.; GAO, J. S.; CAO, W. D.; ZOU, C. Q.; HUANG, J.; BAI, J. S. Efeitos da aplicação prolongada de adubo verde sobre o teor e a estrutura da matéria orgânica dissolvida em solo arrozal vermelho. **Revista de agricultura integrativa**, Cruz das Almas, v. 17, n. 8, p. 1852-1860, 2018.
- KAMAU, S. A abundância da macrofauna do solo sob espécies arbóreas dominantes aumenta um longo gradiente de degradação do solo. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 112, p. 35-46, 2017.
- KITAMURA, A. E.; TAVARES, R. L. M.; ALVES, M. C.; DE SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery of degraded Cerrado soil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 50, n. 8, p. 1-8, 2020.
- LIANG, L. Assessing vegetation restoration prospects under different environmental elements in cold and arid mountainous region of China. **Catena**, Amsterdam, v. 226, p. 1-13, 2023.
- LIMA, J. S.; LEITE, G. L. D.; GUANABENS, P. F. S. Insects and spiders on Acacia mangium (Fabaceae) saplings as bioindicators for the recovery of tropical degraded áreas. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 84, p. 1-11, 2024.
- LOPES, P. G. N.; MARCIANO, C. R.; FAUSTINO, L. L. Hydrodynamic attributes and potential hydrophobicity of a Typic Hapludult soil under secondary Atlantic forest, degraded pasture and leguminous trees, in Southeastern Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 26, p. 1-11, 2021.
- LUTINSKI, J. A.; GUARDA, C.; LUTINSKI, C. J.; GARCIA, F. R. M. Fauna de formigas em áreas de preservação permanente de usina hidroelétrica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1741-1754, 2018.
- MANOEL, R. O.; ROSSINI, B. C.; CORNACINI, M. R.; MORAES, M. L. T.; CAMBUIM, J.; ALCÂNTARA, M. A. M.; SILVA, A. M.; SEBBENN, A. M.; MARINO, C.

L. Landscape barriers to pollen and seed flow in the dioecious tropical tree *Astronium fraxinifolium* in Brazilian savannah. **Plos One**, San Francisco, v. 2, p. 1-19, 2021.

MARTINS, W. B. R.; BALESTRIN D.; FONSECA, C. A. Mining in the Amazon: Importance, impacts, and challenges to restore degraded ecosystems. Are we on the right way?. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 174, p. 1-12, 2020.

OLIVEIRA, M. M.; DANTAS, N. S.; ARAUJO, S. M. S. Recuperação de áreas degradadas e mineração: análise da produção científica internacional na Web of Science (WoS). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. 1-18, 2020.

PEREIRA, A. P. A.; ZAGATTO, M. R. G.; BRANDANI, C. B.; MESCOLOTTI, D. L.; COTTA, S. R.; GONÇALVES, J. L. M.; CARDOSO, E. J. N. Acácia altera indicadores microbianos e aumenta C e N nas frações orgânicas do solo em plantios consorciados de eucalipto. **Fronteiras em Microbiologia**, [S. l.], v. 9, p. 1-13, 2018.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L. OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OYALA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 386, p. 1-10, 2021.

PRACH, K.; WALKER, L. R. Differences between primary and secondary plant succession among Biomes of the world. **Journal of Ecology**, v. 107, p. 510–516, 2019.

ROCHA, R. S.; MONTEIRO, V. F.; SANTOS, C. R. C.; FERNANDES, A. P. D. Effects of the planting of legume species and soil conditions on the recovery of a sand and pebble mining área. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 32, p. 1695–1705, 2021.

SHIBU, J.; DOLLINGER, J. Silvopasture: a sustainable livestock production system. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 93, n. 1, p. 1-9, 2019.

SILVA, J. L.; LEITE, G. L. D.; SOUZA, T. W.; SOUZA, S. F. W.; SAMPAIO, R. A.; AZEVEDO, A. M.; SERRÃO, J. E.; ZANUNCIO, J. C. Diversidade de artrópodes em *Acacia mangium* (Fabaceae) e produção desta planta com lodo de esgoto desidratado em área degradada. **Royal Society Open Science**, London, v. 7, n. 2, p. 1-11, 2020.

SILVA, J. P.; TEIXEIRA, R. D. S.; DA SILVA I. R.; SOARES, E. M.; LIMA, A. M. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos de leguminosas e não leguminosas em solo tropical. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 73, n. 1, p. 1-12, 2022.

WAN, H.; XIE, Y.; LI, B.; CAI, Y.; YANG, Z. An integrated method to identify and evaluate the impact of hydropower development on terrestrial ecosystem. **Environmental Impact Assessment Review**, Philadelphia, v. 99, p. 1-11, 2023.

YAN, Y. Afforestation promotes ecosystem multifunctionality in a hilly area of the Loess Plateau. **Catena**, Amsterdam, v. 223, p. 1-9, 2023.

ZHANG, C. C:N:P stoichiometry of plant-soil-microbe in the secondary succession of zokor-made mounds on Qinghai-Tibet Plateau. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 222, p. 1-9, 2023.

CAPÍTULO 2 - EVOLUTION OF SOIL CHEMICAL FERTILITY IN AN AREA UNDER RECOVERY FOR 30 YEARS WITH ANTHROPIC INTERVENTION

ABSTRACT

The investigation and application of recovery techniques associated with the use of qualitative and quantitative indicators enable the ecological restoration of these sites. In this context, the main difficulty consists of establishing the A horizon, capable of supporting the emergence of other horizons, choosing appropriate species, and adding organic matter to the soil in a balanced way. Thus, this study aimed to evaluate over time (1992 to 2022) the chemical properties of a stripped oxisol that has been in the recovery process for 30 years, using liming, gypsum, and introduced and spontaneous plant species. All treatments were cultivated with *Urochloa decumbens* (Stapf.) in 1999 and tree species in 2007, with randomized blocks of 10x10m and 2m spacing between them. Seven treatments were applied and four replications were carried out. 56 soil samples were collected at a depth of 0-0.10 and 0.10-0.20m for analysis of phosphorus, organic matter, pH, and base saturation. ANOVA and Scott-Knott test (5%), Pearson correlation, and response surface analysis were performed for each studied soil attribute. The results showed that the treatments with cover crop + limestone + gypsum had the highest values of organic matter compared to the recovery treatments and that the treatments have been efficient in soil recovery. Therefore, the soil undergoing recovery showed an increase in P, OM, pH, and base saturation until 2022, and the response surface method was the most efficient in analyzing the results over time.

Keywords: cover crop species; organic matter; pH; revegetation; signalgrass; soil degradation

RESUMO

A investigação e aplicação de técnicas de recuperação associadas ao uso de indicadores qualitativos e quantitativos possibilitam a reabilitação ecológica de locais degradados. Nesse contexto, a principal dificuldade consiste em estabelecer o horizonte A, capaz de suportar o surgimento de outros horizontes, escolher espécies apropriadas e agregar matéria orgânica ao solo de forma equilibrada. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar, ao longo do tempo (1992 a 2022), os atributos

químicos de um Latossolo Vermelho distrófico que está em processo de recuperação há 30 anos, utilizando calagem, gesso e espécies vegetais introduzidas e espontâneas. Todos os tratamentos foram cultivados com *Urochloa decumbens* (Stapf.) em 1999 e espécies arbóreas em 2007, com blocos casualizados de 10x10m e espaçamento de 2m entre si, foi aplicado sete tratamentos e realizado quatro repetições. Foi coletado 56 amostras de solo na profundidade de 0-0,10 e 0,10-0,20m para análise dos teores de fósforo, matéria orgânica, pH e saturação por bases. ANOVA e teste Scott-Knott (5%), correlação de Pearson e análise de superfície de resposta foram realizados para cada atributo do solo estudado. Os resultados mostraram que os tratamentos com cultura de cobertura + calcário + gesso apresentaram os maiores valores de matéria orgânica em relação aos tratamentos de recuperação e que os tratamentos têm sido eficientes na recuperação do solo. Portanto, o solo em recuperação apresentou aumento no P, MO, pH e saturação por bases até 2022, sendo o método de superfície de resposta o mais eficiente na análise dos resultados ao longo do tempo.

Palavras-chave: Cultura de cobertura; Matéria orgânica; pH; Revegetação; *Urochloa decumbens*; Degradação do solo.

2.1 Introduction

The construction of the Ilha Solteira Hydroelectric Power Plant on the Paraná River, between the states of São Paulo and Mato Grosso do Sul (Brazil), in the 1960s left behind extensive degraded areas known as “borrowed areas” and characterized by the removal of the vegetation and superficial soil horizons (FARDIN *et al.*, 2021).

As a consequence of the construction, several areas, annexed or not to the body of work, tend to suffer accentuated degradation, which manifests itself in the form of a rupture in the balance between the lithosphere (especially in its most fragile portion, the soils), the hydrosphere and the biosphere (especially the vegetation cover). Therefore, the preservation of ecosystems requires, in principle, preserving the original characteristics of the object in question; thus, it is necessary to use elements and techniques similar to those that gave rise to the object to restore, in addition to controlling the agents that lead to the mischaracterization or its degeneration.

The resolution of contemporary environmental problems contributes to a better understanding of the study of ecological succession (MOTA *et al.*, 2023). According to Prach Prach e Walker (2011), restoration practices clearly benefit from the results of successional studies.

According to Bonini (2023), when planning the recovery of degraded soil, the main objective to be achieved is the establishment of an A horizon so that, from there, the process is catalyzed by the biosphere, providing the possibility of the emergence of other horizons, according to natural conditioning. In soil restoration work, the initial activity is to identify and characterize the active degradation processes and analyze their environmental consequences. Thus, it is necessary to use indicators that allow us to qualify and quantify the degree of existing degradation in the area to restore as well as to monitor the evolution of soil rehabilitation through these indicators afterward (BONINI *et al.*, 2023).

The use of different techniques to recover degraded soils has become more and more frequent. In this regard, the use of waste has been reported as a possibility to reduce costs with mineral fertilizers, in addition to being an alternative for final disposal (KITAMURA *et al.*, 2020; BONINI, ALVES, MONTANARI, 2015). Several types of waste have been used in recovery actions in the Cerrado. Several studies have been carried out with the objective of verifying which materials (cover crop, mineral fertilizer, sewage sludge, slag, waste from pulp production) added to the soil are more efficient in enriching soil organic matter (MOTA *et al.*, 2023; MIZOBATA, 2017; MACHADO *et al.* 2014).

The soil chemical properties of tropical soils have characteristics peculiar to the Cerrado biome (BONINI, ALVES, MONTANARI, 2015). The low content of organic matter and phosphorus and the high pH of the soil are the main characteristics. These characteristics are interconnected and are favored by the hot and humid climate, providing a very rapid degradation of soil organic matter. The main challenge in the management of Cerrado soils is the enrichment and maintenance of the soil's organic matter content. In the recovery of degraded soils, the challenge is even greater due to the low resilience of these soils and the lack of material for regenerating this soil.

With the increase in organic matter in the soil, there is an increase in pH and, with it, greater availability of all essential nutrients for plant development, thus creating a favorable environment for the development of organisms in the soil that

will act to improve the chemical and physical qualities of the soil. With the action of soil organisms, there is an improvement in soil structure by increasing cementing agents and mechanical action.

According to Machado *et al.* (2023), the effect of limestone application goes beyond the increase in pH and emphasizes that in oxisols, loads are dependent on pH, which can favor clay dispersion, also providing Ca^{+2} , which works as a binder between clay particles. Not forgetting the indirect effects of increasing crop production, the addition of OM, and microbial activity.

Soil degradation has negatively altered the quality of soil chemical properties, compromising plant development, as it alters the organic matter content, increasing the challenge in soil management; that is, it makes it difficult to enrich and maintain this chemical attribute (MATOS *et al.* 2022). Research has been carried out aiming to contribute with techniques for a higher addition of organic matter to soils using plant species, mineral fertilizers, and residues (GIÁCOMO *et al.*, 2019; TERAN *et al.*, 2022; BONINI NETO *et al.*, 2019).

The intensive use of the soil and inadequate production practices cause changes in the landscape, thus altering the microbial biomass and the composition and diversity of the edaphic macro- and mesofauna, which are important factors in the process of fragmentation and redistribution of plant residues, mineralization, and humification of soil organic matter (ARAUJO *et al.*, 2016; HOFFMANN *et al.*, 2018).

The effects of the interaction of the quantity and quality of organic materials, the used species, and the climate conditions of the location are important for understanding the results in the process of recovering soil chemical properties (KITAMURA *et al.*, 2020; 23; SILVA *et al.*, 2020). In addition, the use of gypsum and alternative co-products is of paramount importance in soil recovery (MOTA *et al.*, 2023; SOUTO FILHO *et al.*, 2017; ALBUQUERQUE, FONSÊCA, SANTOS, 2018).

The increase in soil organic matter leads to an increase in pH and hence a higher availability of all essential nutrients for plant development. Thus, it creates a favorable environment for the development of organisms that will act to improve the soil's chemical and physical qualities. The action of soil organisms causes an improvement in soil structure by increasing cementing agents and mechanical action (BONINI NETO *et al.*, 2019).

With that, it is expected that in this work, the addition of correctives and soil conditioners can accelerate the process of recovery of soil fertility quality. They aimed

to evaluate the chemical properties of a degraded oxisol that has been in the process of recovery for 30 years, using liming, gypsum, and plant species over time by different analysis methods aiming at its recovery of the fertility quality of the soil and the best treatment to be used over time.

2.2 Materials and Methods

The experiment was carried out at the Farm for Teaching, Research, and Extension of Unesp, in the municipality of Selvíria/MS, Brazil, between the coordinates 20°22' S and 51°22' W (Figure 2.1a), and altitude around 327 m above sea level. The mean annual temperature is 23.5 °C, and the mean annual precipitation is 1370 mm. The characteristic soils of the study region present a sandy clay loam texture, are rich in sesquioxides, and are classified as Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018), that is, Oxisol (CARVALHO *et al.*, 2017).

The region's climate type is classified as Aw according to Koppen (1990), with dry, mild winters and hot, rainy summers. The region has an average annual precipitation of 1370 mm, an average annual temperature of 23.5 °C and relative humidity between 70-80% (annual average) (Figure 2.2). The soils in the region are predominantly clayey-sandy in texture and rich in sesquioxides, classified as dystrophic Red Oxisol (SANTOS *et al.*, 2018) or Oxisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

A layer of 8.6 m of the original soil profile was removed in the area under study (Figure 2.1b) for the earthworks and foundation of the dam for the construction of the hydroelectric plant of Ilha Solteira-SP, which began in the 1960s, and the subsoil had been exposed since 1969, creating a degraded area (ALVES, NASCIMENTO, SOUZA, 2012).

In 1992, the subsoil showed surface compaction and a low presence of spontaneous vegetation. The recovery work began that year, and soil tillage was carried out by subsoiling, reaching an average depth of 0.40 m. A plowing operation was also carried out, followed by a harrowing leveling operation. The chemical characterization of the area was carried out, as shown in Table 2.1.

Table 2.1 - Initial characterization (1992), Selvíria—MS (Brazil).

Layer	Presin	O.M.	pH (CaCl ₂)	K	Ca	Mg	H + Al	S	CEC	V
-------	--------	------	----------------------------	---	----	----	--------	---	-----	---

m	mg·dm ⁻³	g·dm ⁻³			mmol _c ·dm ⁻³		mg·dm ⁻³			%
0.00–0.20	1	7.0	4.0	0.2	2.0	1.0	20.0	3.2	23.2	14
0.20–0.40	0	4.0	4.2	0.2	2.0	1.0	20.0	3.2	23.2	14

Source: BONINI NETO *et al.*, (2019)

Subsoiling reached an average depth of 0.40m in the area under study. During the research period, the soil was prepared by plowing, using a mouldboard plow pulled by a 110 hp tractor. Subsequently, a leveling harrow was carried out with a drag harrow coupled to an 85hp tractor.

The sowing of the species was carried out manually, while the furrows were created by a set consisting of a 75hp tractor and a furrower. The grooves had dimensions of approximately 0.50m between lines and 0.15m deep.

The sowing density of green manures was established at 10 plants per linear meter. Soil correction was based on the chemical characterization of the experimental area. The application of limestone to achieve a base saturation of 70% was carried out with 18.5kg of limestone per plot (plots with limestone only). In the plots with limestone and gypsum, 20% of the CaO from the limestone was replaced by the CaO from the gypsum, applying 5.2 kg of gypsum and 13.8 kg of limestone per plot, both incorporated into the soil. Dolomitic limestone with 70% PRNT was used.

In 1996, soil correction was carried out again based on chemical analyses, especially for treatments with limestone and limestone plus gypsum. The replacement of CaO from limestone with CaO from gypsum followed the same procedure as at the beginning of the experiment. The correction was implemented in cases where base saturation was below 60%, aiming to increase this index to 70%.

Cover crop species (velvet bean, pigeonpea, black oats, and jack bean) were manually sown from 1992 to 1996 in December–January. Corn (*Zea mays* L.), black oats (*Avena strigosa* Schreb), and signalgrass (*Urochloa decumbens* Stapf.) were sown in 1997, 1998, and 1999, respectively.

Tree species native to the Cerrado appeared naturally in 2006 as quality indicators of the stripped oxisol. Some physical and chemical soil properties, as well as signalgrass dry mass and the height and diameter of these species, were studied from 2008 to 2012. The area has been cultivated with *Urochloa decumbens* (Stapf.) from 1999 to date (MACHADO *et al.* 2014).

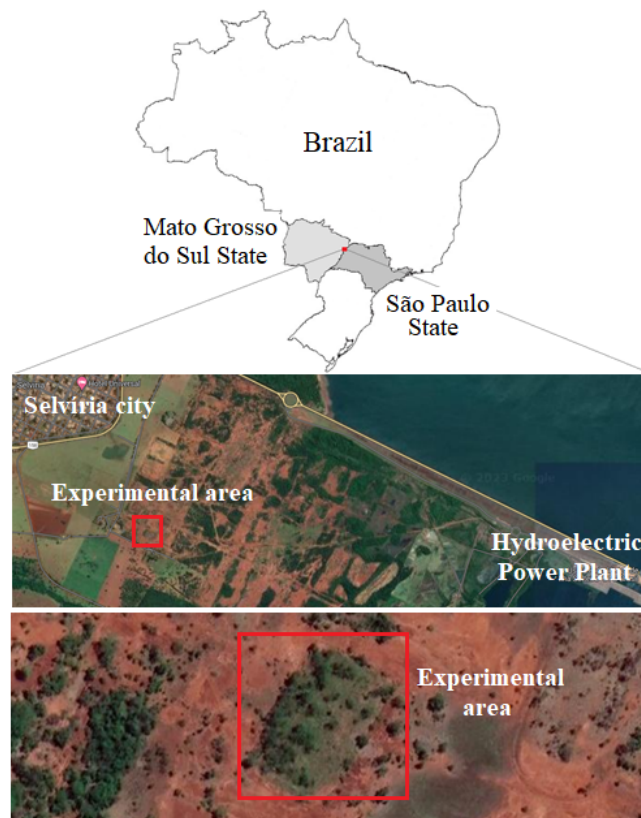
With 14 to 15 years of influence of treatments on soil recovery, native tree plant species began to appear spontaneously in the study area. In the recovery of degraded areas, the ecosystem and the resilience of the site must be taken into account. It can be seen that, of the three species that regenerated naturally in the study area, two belonged to the Fabaceae Family (*M. lacticifera* and *M. acutifolium*), which are considered essential for the successful recovery of a degraded area due to their hardiness and high capacity to add organic matter to the soil. In order to determine which species, how, and when to introduce them in the area to be restored, it is much more important to take into account the natural succession of the area rather than being restricted to species according to their classification in successional ecological groups (MOTA *et al.*, 2023).

Photographic records were conducted in all studied periods (Figure 2.3), which are important to establish relationships with the soil data in this study.

Plots of 10 × 10 m were used for the experimental design, which consisted of randomized blocks with 2 m spacing from each other, with the application of seven treatments and four replications, as presented in Table 2.2. Soil samples were collected in 1993, 1995, 1997, 1998, 2008, 2009, 2010, 2011, and 2022 from the 0.00–0.10 and 0.10–0.20 m layers for analysis.

56 individual soil samples were collected using an auger, which were combined in a bucket to form a composite sample per plot. This composite sample was then transferred to a properly identified plastic bag and sent to the laboratory for the drying process.

Figure 2.1 - (a) Area map and (b) general view of the decapitated area showing the 8.6 m thick cut. Selviria—MS (Brazil).



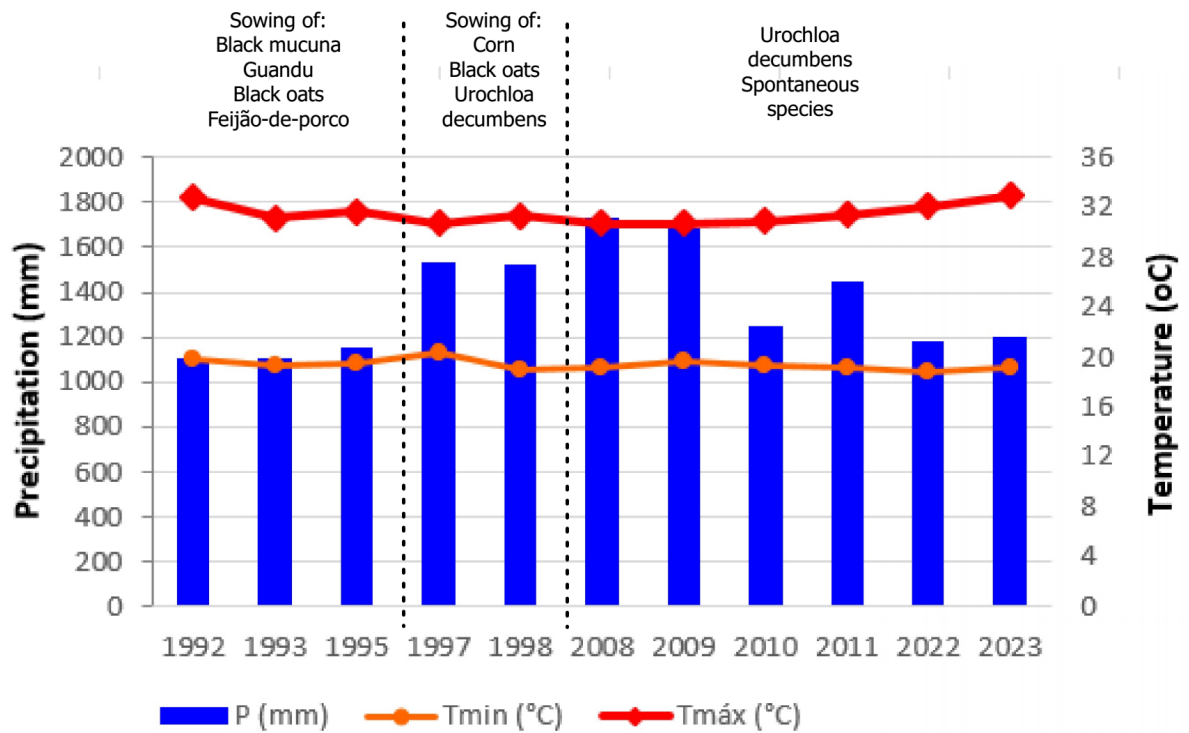
(a)



(b)

Source: Bonini (2012).

Figure 2.2 - Total annual precipitation and average annual temperature in the Municipality of Selvíria-MS.



Source: UNESP (2023); Author himself (2023).

Figure 2.3 - Photographic record of the experimental area from 1992 to 2022, Selviria—MS (Brazil).



February/1992



February/1993



March/1997



July/1998



July/1999



October/2006



January/2009
(2008–2011)



January/2022

Source: Alves (2011); Bonini (2015); Rosa (2014); Author himself (2022).

They were analyzed according to the methodology described by Raij (2001), phosphorus (P) content by the extraction method with ion-exchange resin, organic

matter content was determined by the colorimetric method, and the pH in calcium chloride and base saturation, calculated as $V\% = (100 \times SB)/CEC$.

The data were analyzed by ANOVA and Scott–Knott test at a 5% probability level using the software SISVAR (FERREIRA, 2011), Pearson correlation (Excel), and surface plots (MATLAB) for each studied soil attribute.

Table 2.2 - Treatments used in the experimental area (1992–2022) Selviria—MS (Brazil).

Treatments	Treatments		Cultures			
	(1992–1994)	(1994–1997)	1997	1998	(1999–2008)	(2009–2022)
DS/B	Tilling only, spontaneous vegetation	Tilling only, spontaneous vegetation				
VB/S	<i>Stizolobium aterrimum</i>	<i>Stizolobium aterrimum</i>				
P/JB/S	<i>Cajanus cajan</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>				
L + VB/S	Lime + <i>Stizolobium aterrimum</i>	Lime + <i>Stizolobium aterrimum</i>	<i>Zea mays</i>	<i>Avena atrigosa</i>	<i>Urochloa decumbens</i>	<i>Urochloa decumbens</i> + Native tree species
L + P/JB/S	Lime + <i>Cajanus cajan</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>				
L + G + VB/S	Lime + gypsum + <i>Stizolobium aterrimum</i>	Lime + gypsum + <i>Stizolobium aterrimum</i>				
L + G + P/JB/S	Lime + gypsum + <i>Stizolobium aterrimum</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>				

Keys: SA: *Stizolobium aterrimum* (Piper and Tracy); CC: *Cajanus cajan* (L. Millsp); CE: *Canavalia ensiformis* (L.DC); *Zea mays* (L.); *Avena strigosa* (Schieb) and *Urochloa decumbens* (Stapf.).

Source: Author himself (2023).

2.3 Results and Discussion

The data were evaluated using conventional statistics (ANOVA and Scott–Knott test at 5%), the correlation between attributes, and surface plots as a function of years and treatments. The analysis methodologies were different, but the results were similar, except for the correlation.

Table 2.3 shows the correlations of the studied soil attributes. Soil pH and V (%) in the two studied soil layers showed positive correlations higher than 0.6, as well as P with OM in the first soil layer. This behavior confirms the relationship between soil variables and shows that the OM contribution is important for the increment of

nutrients in the soil, as well as the pH correction in the increase in base saturation, in agreement with Bonini Neto *et al.* (2019).

The soil organic material is very important in the recovery process; in its mineralization process, it provides the soil with exchangeable cations, which are used for plant nutrition. The soil pH, when close to neutrality, immobilizes the aluminum present in the soil and makes calcium, potassium, and magnesium available to the plant, increasing base saturation.

Table 2.3 - Correlation of Pearson of soil attributes studied (P (mg·dm⁻³), pH, OM (g·dm⁻³), and V (%)). Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.

	P	P2	OM	OM2	pH	pH2	V	V2	
P	-	0.654	0.543	0.269	-0.099	0.184	-0.331	-0.172	
P2		-	0.328	0.171	-0.028	0.112	-0.284	-0.176	
OM			-	0.807	-0.326	0.124	-0.290	-0.073	
OM2				-	-0.314	0.049	-0.202	0.032	
Legend: P	pH				-	0.458	0.779	0.370	=
	pH2					-	0.325	0.615	
	V						-	0.473	
	V2							-	

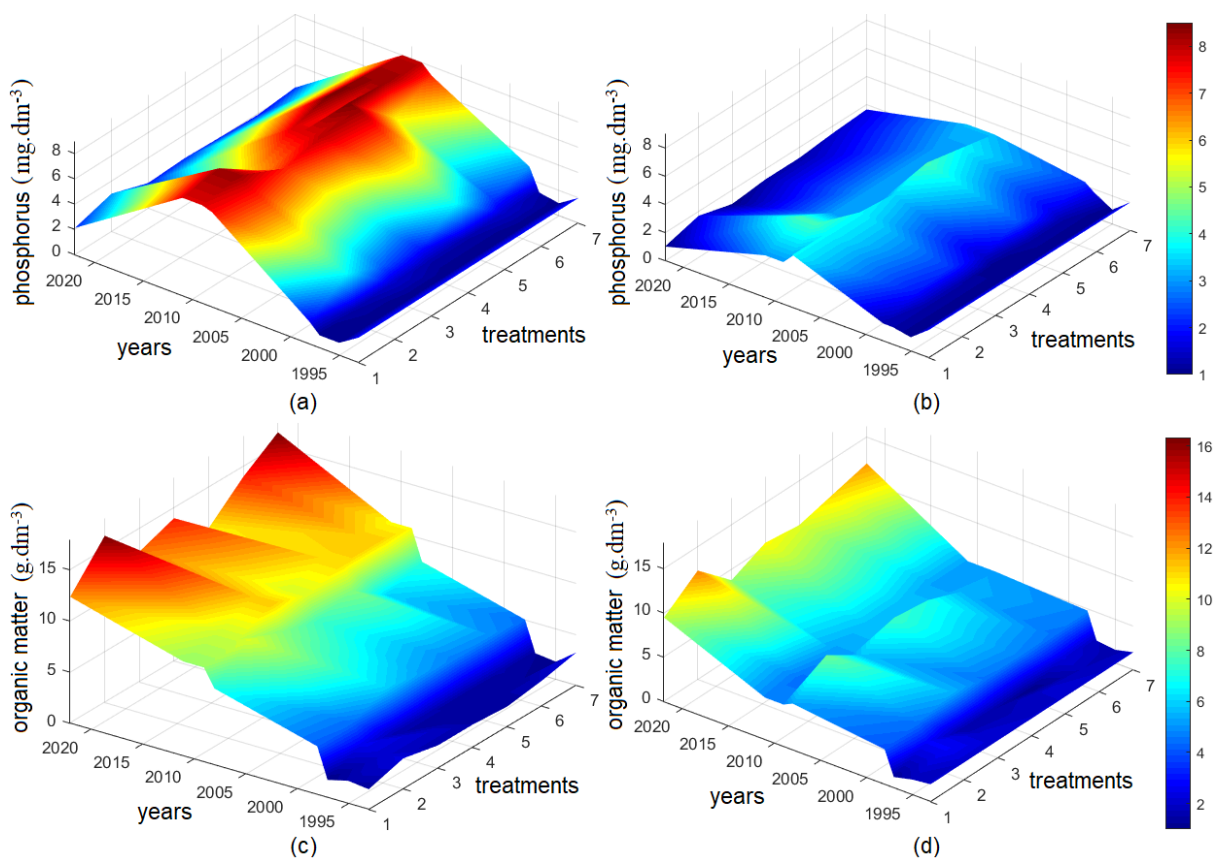
phosphorus, OM = organic matter, pH, V = base saturation in the 0.00–0.10 m layer; P2 = phosphorus, OM2 = organic matter, pH2, V2 = base saturation in the 0.10–0.20 m layer.

Source: Author himself (2023).

Still corroborating this study, improvements in soil fertility due to the use of forest species in the recovery of degraded areas were observed by Giacomo *et al.* (2019) in a degraded area using residues from the pulp and paper industry, mainly because they serve as vegetation cover with tree species, protecting the soil from climate agents, maintaining and adding organic matter to the soil, mobilizing and recycling nutrients, and favoring soil biological activity. The other correlations were negative or very low and cannot be an indication of the soil attributes studied in this research.

Figures 2.4 and 2.5 show the response surfaces with the behavior of the soil attributes studied over 30 years as a function of the treatments. The analysis provides evidence that the first soil layer was more influenced by the treatments, mainly due to the soil protection by the vegetation cover present in the area (Figure 2.3).

Figure 2.4 - Response surface plots for phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$): (a) 0–0.10 m and (b) 0.10–0.20 m and organic matter ($\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$): (c) 0–0.10 m and (d) 0.10–0.20 m, depending on the years and treatments studied. Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.



Source: Author himself (2023).

The highest phosphorus contents were detected in the soil in 2010 and 2011, which is due to organic matter mineralization. A significant increase in tree species was observed in the area and, consequently, higher consumption of nutrients for the maintenance of plant biomass, leading to a reduction in phosphorus content from 2015.

The organic matter in the first soil layer increased throughout the studied period, showing the relation of its contribution to the vegetation present in the area.

This behavior was already smaller in the area in the second soil layer. Similar data were found by Rossi *et al.* (2023), who studied soil carbon and reported a positive influence on vegetation and soil carbon content and phosphorus availability.

In addition, the increase of OM in the soil acts positively in the recovery process, either by providing nutrients from mineralization or also by better soil structuring (physical quality), which interferes with soil porosity and aeration (KITAMURA *et al.*, 2020; GIACOMO *et al.*, 2019; BONINI, ALVES, MONTANARI, 2015).

Treatments with limestone and/or limestone + gypsum addition differed in the analysis of soil pH (Figure 2.5). However, the effect dissipated over 30 years, which indicates that a new soil correction can improve this index and increase V%, corroborating the correlation analysis (Table 2.3). Base saturation showed the same behavior as soil pH. Importantly, the values found in this study are below those recommended by the literature for this type of soil, according to Raij *et al.* (2001). I still agree with Mota *et al.* (2023) who studied areas of gypsum mined over time and found that the residual effect of gypsum contributes to the primary succession of areas, as occurs in this work.

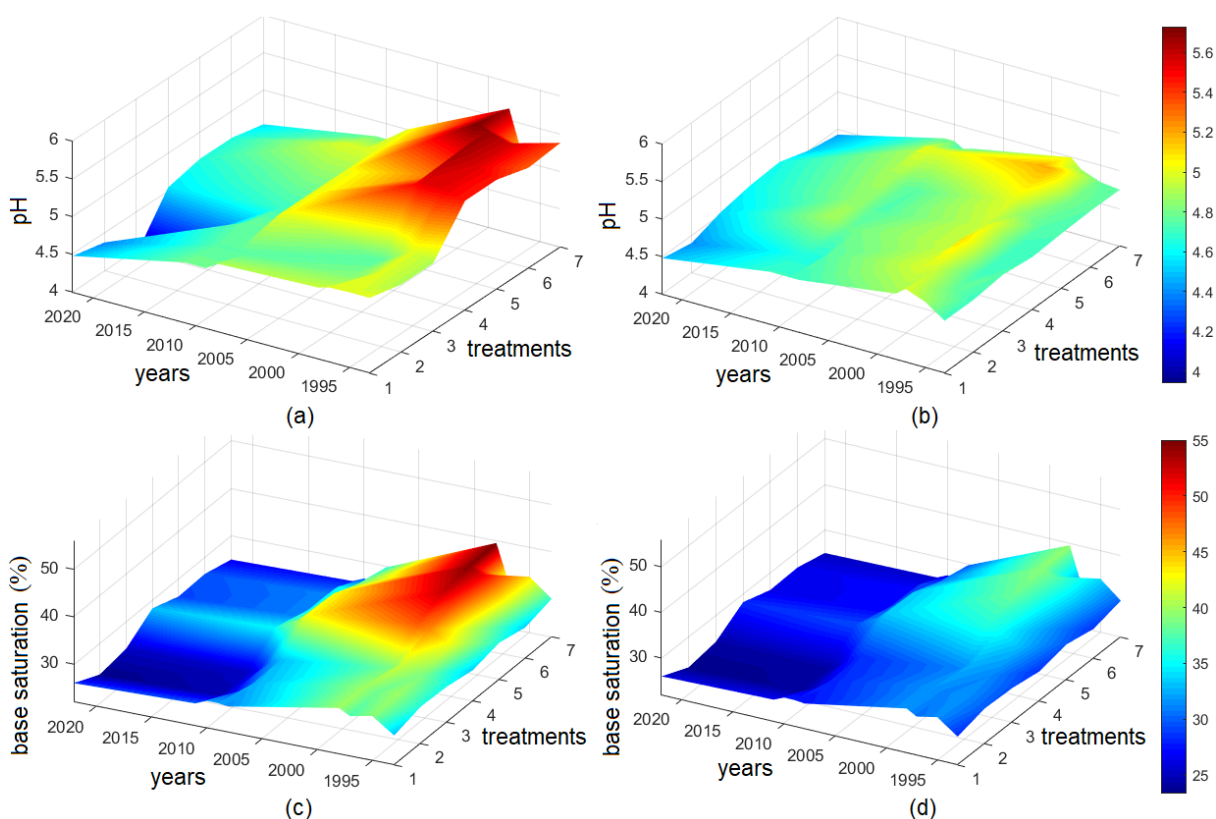
Table 2.4 shows the mean values of soil attributes, F (5%), and coefficients of variation as a function of treatments and years of evaluation in the 0.00–0.10 and 0.10–0.20 m layers. There was a significant difference between treatments, soil depth, and years of evaluation for phosphorus, organic matter, pH, and base saturation.

Phosphorus contents were very low in 1993, 1995, 1997, and 1998. The treatments showed the same mean value for phosphorus until 1998, but a small variation was identified in the concentrations from that period in the treatments with cover crop and soil correction, as well as in the control (disturbed soil).

The highest phosphorus contents were found in 2008, 2009, 2010, and 2011, but these values are classified as low. However, the treatment with limestone plus pigeon-pea in 2009 and 2011 differed from the others and the control, presenting a much higher value than that found in the other treatments in the 0.00–0.10 m layer. Similar results were found by Bonini, Alves, Montanari, (2015), who studied chemical attributes in this same experimental area and obtained the highest phosphorus value in the application of the treatment with limestone plus pigeonpea.

The treatment with limestone + pigeonpea had the highest phosphorus content and differed statistically from the others in the 0.10–0.20 m layer in 2008. In contrast, the velvet bean treatment that had the highest phosphorus contents in 2009, 2010, and 2011, not differing from the other treatments and the control. An increase in the phosphorus content was observed compared to the previous period, which shows the efficiency of the conservationist practices adopted for the recovery and improvement of this chemical property.

Figure 2.5 - Response surface plots for pH: (a) 0–0.10 m and (b) 0.10–0.20 m and base saturation (%): (c) 0–0.10 m and (d) 0.10–0.20 m, depending on the years and treatments studied. Selviria—MS—Brazil. 1992–2022.



Source: Author himself (2023).

This parameter presented a very low result in 2022, close to that obtained in 1998 in the fertile soil layer, whose mean content should be 13–30 mg dm⁻³ for perennial crops, according to Raij *et al.* (2001). The treatment with velvet bean presented the highest phosphorus contents in the 0.00–0.10 m layer, not differing from the other treatments. In contrast, the treatments with velvet bean and limestone

+ gypsum + pigeonpea showed the highest phosphorus contents in the 0.10–0.20 m layer, not differing from the other treatments. Compared to the previous period, the treatments showed no efficiency in soil recovery for phosphorus contents.

Cordeiro and Rosolem, Merlin, Bull (2014) e Cordeiro *et al.* (2005) studied the dynamics of phosphorus in the soil and identified that signalgrass cultivation promotes an increase in the activity of the acid phosphatase enzyme, which may favor the increase in phosphorus adsorption because it is an excellent host for mycorrhizal fungi. According to Baptistella *et al.* (2022), signalgrass can benefit from the water available in the subsurface and absorb more phosphorus since it can explore deeper soil layers.

Table 2.4 - Mean values and coefficients of variation for phosphorus (P)—mg·dm⁻³, organic matter (OM)—g·dm⁻³, pH, and base saturation (V)—%, depending on the treatments studied in the layers of 0.00–0.10 and 0.10–0.20 m. Selviria, MS (Brazil). 1993–2022.

Treatment	P	OM	pH	V	P	OM	pH	V
	0.00–0.10 m				0.10–0.20 m			
DS/B	4.29 b	6.48	4.71 b	32.11 b	2.13	4.30	4.52 b	26.44
VB/S	4.83 b	7.84	4.65 b	32.25 b	2.71	5.23	4.54 b	27.62
P/JB/S	3.61 c	7.77	4.61 b	33.71 b	2.30	4.58	4.63 b	26.19
L + VB/S	4.4 b	7.22	5.10 a	41.45 a	2.13	5.00	4.82 a	34.75
L + P/JB/S	6.32 a	7.22	5.10 a	40.38 a	2.86	4.88	4.72 a	30.19
L + G + VB/S	4.34 b	7.47	5.13 a	42.81 a	2.25	4.75	4.96 a	32.81
L + G + P/JB/S	4.51 b	7.59	5.00 a	39.47 a	2.40	4.77	4.74 a	29.66
Subplot (year)								
1993	2.00 d	2.46 e	5.07 a	43.14 a	2.00 c	2.10 d	4.42 c	25.32 c
1995	1.00 e	2.21 e	4.95 a	46.21 a	1.00 d	1.92 d	4.49 c	35.28 b
1997	1.25 e	2.25 e	5.09 a	37.71 b	1.46 d	1.71 d	4.61 c	26.87 c
1998	2.71 c	5.39 d	5.17 a	42.42 a	1.96 c	4.64 c	5.13 a	40.53 a
2008	7.35 b	8.28 c	4.96 a	33.89 c	4.00 a	6.35 b	4.71 b	27.00 c
2009	8.75 a	10.64 b	4.80 b	32.46 c	3.28 b	5.21 c	4.83 b	26.92 c
2010	7.55 b	10.64 b	4.80 b	32.46 c	3.28 b	5.21 c	4.83 b	26.92 c
2011	8.75 a	10.64 b	4.80 b	32.46 c	3.28 b	5.21 c	4.83 b	26.92 c
2022	2.18 d	13.82 a	4.45 c	36.37 b	1.33 d	10.72 a	4.50 c	31.22 c
F treat (T)	13.30 *	1.70 *	13.51 *	6.47 *	1.82 *	2.98 *	4.42 *	2.70 *
F year (Y)	308.16 *	249.42 *	11.61 *	12.70 *	49.76 *	88.39 *	11.51 *	12.33 *
F T × Y	8.21 *	1.54 *	3.02 *	2.28 *	1.10 *	0.91 *	1.84 *	1.37 *
CV1(%)	29.83	28.74	7.71	28.96	52.27	21.49	9.50	39.77
CV2(%)	22.03	20.03	6.85	20.90	33.55	32.99	7.41	25.92

Means followed by equal letters in the column do not differ from each other by the Scott-Knott test at 5% probability. Keys: DS/B = disturbed soil until 1999, then signalgrass implantation; VB/S = velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; P/JB/S = pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+VB/S = limestone + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; L+P/JB/S = limestone + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+G+VB/S = limestone + gypsum + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; and L+G+P/JB/S = limestone + gypsum + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999. Native tree species planted in the area after 2010.

Source: Author himself (2023).

Table 2.5 shows the mean values for soil organic matter in the 0.00–0.10 m layer. The values of organic matter were the lowest in 1993, 1995, 1997, and 1998 when compared to the other years of study. On average, the control obtained the lowest organic matter contents, while the highest values were identified with the velvet bean treatment, not statistically different from the other treatments. The organic matter content in the 0.10–0.20 m layer showed slightly lower values but not differing from each other.

Table 2.5 - Unfolding of the interaction between year of assessment and treatment regarding the mean values of P (mg dm⁻³) and MO (g dm⁻³), in the layers of 0.00-0.10 and 0.10-0.20m. Selviria, MS (Brazil). 1993 to 2022.

Treatment/year	1993	1995	1997	1998	2008	2009	2010	2011	2022
(P) 0.00-0.10 m									
DS/B	2.00 BC	1.00 ab	1.00 ab	1.75 bB	7.50 aA	7.75 ba	7.75 aA	7.75 ba	2.12 AB
VB/S	2.00 BC	1.00 BC	1.25 BC	3.75 ab	7.75 aA	8.25 ba	8.25 aA	8.25 ba	3.00 ab
P/JB/S	2.00 BC	1.00 BC	1.50 BC	2.50 BC	7.00 aA	5.50 cB	5.50 bB	5.50 cB	2.00 BC
L+VB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.25 ab	2.00 bB	8.00 aA	7.75 ba	7.75 aA	7.75 ba	2.12 AB
L+P/JB/S	2.00 ad	1.00 ad	1.00 ad	3.75 BC	8.25 ab	15.75 aA	7.41 AB	15.75 aA	2.00 ad
L+G+VB/S	2.00 BC	1.00 BC	1.50 BC	2.25 BC	5.75 bB	8.25 ba	8.25 aA	8.25 ba	1.87 BC
L+G+P/JB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.25 ab	3.00 ab	7.25 aA	8.00 ba	8.00 aA	8.00 ba	2.16 AB
(P) 0.10-0.20 m									
DS/B	2.00 BC	1.00 ab	1.25 ab	1.25 ab	3.75 ba	3.00 aA	3.00 aA	3.00 aA	1.00 ab
VB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.25 ab	2.00 BC	3.75 ba	4.25 aA	4.25 aA	4.25 aA	1.66 ab
P/JB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.75 ab	2.25 ab	3.75 ba	3.00 aA	3.00 aA	3.00 aA	1.00 ab
L+VB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.00 ab	1.50 ab	3.50 ba	3.00 aA	3.00 aA	3.00 aA	1.25 ab
L+P/JB/S	2.00 BC	1.00 BC	2.00 BC	2.75 ab	6.25 aA	3.50 ab	3.50 ab	3.50 ab	1.25 BC
L+G+VB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.25 ab	1.75 ab	3.75 ba	3.00 aA	3.00 aA	3.00 aA	1.50 ab
L+G+P/JB/S	2.00 BC	1.00 ab	1.75 ab	2.25 ab	3.25 ba	3.25 aA	3.25 aA	3.25 aA	1.66 ab
(OM) 0.00-0.10 m									
DS/B	2.00 ad	2.25 AD	1.75 ad	4.75 BC	7.50 bB	9.25 ab	9.25 ab	9.25 ab	12.37 ca
VB/S	3.00 BC	2.75 BC	3.25 BC	5.00 BC	10.25 BC	10.00 ab	10.00 ab	10.00 ab	16.33 aA
P/JB/S	2.25 AD	2.75 AD	2.25 AD	6.50 BC	9.00 ab	11.50 aA	11.50 aA	11.50 aA	12.75 ca
L+VB/S	2.25 aE	2.00 aE	2.25 aE	5.75 AD	8.00 BC	10.25 BC	10.25 BC	10.25 BC	14.00 ba
L+P/JB/S	2.00 BC	2.00 BC	2.00 BC	5.25 AB	9.00 aA	11.25 aA	11.25 aA	11.25 aA	11.00 ca
L+G+VB/S	2.50 ad	2.00 ad	2.25 AD	5.50 BC	6.50 BC	11.50 BC	11.50 BC	11.50 BC	14.00 ba
L+G+P/JB/S	3.25 aE	1.75 aE	2.00 aE	5.00 AD	7.75 BC	10.75 ab	10.75 ab	10.75 ab	16.33 aA
(OM) 0.10-0.20 m									
DS/B	2.75 BC	1.75 BC	1.25 BC	4.00 ab	5.25 bB	4.75 AB	4.75 AB	4.75 AB	9.50 ba
VB/S	2.00 ad	2.75 AD	2.75 AD	4.50 BC	8.25 ab	4.50 BC	4.50 BC	4.50 BC	13.33 aA
P/JB/S	2.00 BC	2.00 BC	1.50 BC	5.50 ab	5.75 bB	5.25 AB	5.25 AB	5.25 AB	8.75 ba
L+VB/S	2.00 BC	1.75 BC	1.50 BC	4.50 ab	7.50 ab	5.75 AB	5.75 AB	5.75 AB	10.50 ba
L+P/JB/S	2.00 BC	2.00 BC	1.00 BC	4.75 AB	7.00 BC	5.75 AB	5.75 AB	5.75 AB	10.00 ba
L+G+VB/S	2.00 BC	1.75 BC	2.25 BC	4.50 ab	5.50 bB	5.25 AB	5.25 AB	5.25 AB	11.00 ba
L+G+P/JB/S	2.00 BC	1.50 BC	1.75 BC	4.75 AB	5.25 bB	5.25 AB	5.25 AB	5.25 AB	12.00 aA

Means followed by equal letters in the column do not differ from each other by the Scott-Knott test at 5% probability. Legend: DS/B = disturbed soil until 1999, then signalgrass implantation; VB/S = velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; P/JB/S = pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+VB/S = limestone + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; L+P/JB/S = limestone + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+G+VB/S = limestone + gypsum + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; and L+G+P/JB/S = limestone + gypsum + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999. Native tree species were planted in the area after 2010.

Source: Author himself (2023).

Table 2.6 - Breakdown of the interaction between year of evaluation and treatment regarding mean pH values and V(%), in the layers of 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m. Selviria, MS (Brazil). 1993 to 2022.

Treatment/year	1993	1995	1997	1998	2008	2009	2010	2011	2022
(pH) 0.00 a 0.10 m									
DS/B	4.45 cA	5.00 aA	4.42 cA	4.65 bA	5.00 aA	4.80 aA	4.80 aA	4.80 aA	4.47 aA
VB/S	4.50 cA	4.75 aA	4.62 cA	4.62 bA	4.75 aA	4.75 aA	4.75 aA	4.75 aA	4.38 aA
P/JB/S	4.30 cB	4.92 aA	4.32 cB	4.75 bA	5.00 aA	4.77 aA	4.77 aA	4.77 aA	3.93 bB
L+VB/S	5.95 aA	5.12 aB	5.75 aA	5.47 aA	5.00 aB	4.70 aB	4.70 aB	4.70 aB	4.55 aB
L+P/JB/S	5.65 aA	5.15 aB	5.65 aA	5.32 aA	5.00 aB	4.82 aB	4.82 aB	4.82 aB	4.65 aB
L+G+VB/S	5.32 bA	4.87 aB	5.67 aA	5.72 aA	5.00 aB	4.97 aB	4.97 aB	4.97 aB	4.65 aB
L+G+P/JB/S	5.37 bA	4.87 aB	5.20 bA	5.65 aA	5.00 aB	4.80 aB	4.80 aB	4.80 aB	4.55 aB
(pH) 0.10 a 0.20 m									
DS/B	4.30 aA	4.47 aA	4.27 bA	4.57 bA	4.50 bA	4.70 aA	4.70 aA	4.70 aA	4.47 aA
VB/S	4.50 aA	4.77 aA	4.35 bA	4.67 bA	4.25 bA	4.65 aA	4.65 aA	4.65 aA	4.40 aA
P/JB/S	4.25 aB	4.60 aA	4.10 bB	4.65 bA	5.00 aA	4.87 aA	4.87 aA	4.87 aA	4.52 aA
L+VB/S	4.40 aB	4.40 aB	5.25 aA	5.45 aA	4.75 aB	4.85 aB	4.85 aB	4.85 aB	4.60 aB
L+P/JB/S	4.52 aB	4.45 aB	4.35 bB	5.22 aA	4.75 aA	4.87 aA	4.87 aA	4.87 aA	4.62 aB
L+G+VB/S	4.45 aC	4.40 aC	5.37 aA	5.67 aA	5.00 aB	5.10 aB	5.10 aB	5.10 aB	4.50 aC
L+G+P/JB/S	4.55 aB	4.37 aB	4.57 bB	5.67 aA	4.75 aB	4.77 aB	4.77 aB	4.77 aB	4.43 aB
(V%) 0.00 a 0.10 m									
DS/B	27.25 bB	45.50 aA	23.50 bB	32.50 bB	32.25 aB	31.50 aB	31.50 aB	31.50 aB	33.50 aB
VB/S	26.25 bA	42.00 aA	31.25 bA	32.25 bA	30.25 aA	31.75 aA	31.75 aA	31.75 aA	33.00 aA
P/JB/S	25.75 bB	47.25 aA	26.75 bB	36.25 bB	36.75 aB	33.25 aB	33.25 aB	33.25 aB	31.12 aB
L+VB/S	61.00 aA	48.00 aB	48.25 aB	48.75 aB	36.50 aC	30.75 aC	30.75 aC	30.75 aC	38.37 aC
L+P/JB/S	55.50 aA	46.25 aA	45.50 aA	44.25 aA	32.75 aB	34.25 aB	34.25 aB	34.25 aB	36.50 aB
L+G+VB/S	54.25 aA	48.00 aA	46.25 aA	51.50 aA	36.25 aB	35.50 aB	35.50 aB	35.50 aB	42.62 aB
L+G+P/JB/S	52.00 aA	46.50 aA	42.50 aA	51.50 aA	32.50 aB	30.25 aB	30.25 aB	30.25 aB	39.50 aA
(V%) 0.10 a 0.20 m									
DS/B	21.25 aA	32.75 aA	19.50 bA	30.75 bA	21.50 bA	27.75 aA	27.75 aA	27.75 aA	29.00 aA
VB/S	29.75 aB	39.75 aA	26.00 bB	36.75 bA	18.00 bB	23.00 aB	23.00 aB	23.00 aB	29.33 aB
P/JB/S	19.50 aB	38.25 aA	17.50 bB	31.25 bA	28.25 aB	25.25 aB	25.25 aB	25.25 aB	25.25 aB
L+VB/S	28.50 aA	39.00 aA	37.25 aA	46.00 aA	31.25 aA	32.50 aA	32.50 aA	32.50 aA	33.25 aA
L+P/JB/S	19.75 aB	32.00 aA	22.50 bB	39.25 bA	35.25 aA	29.25 aA	29.25 aA	29.25 aA	35.25 aA
L+G+VB/S	28.50 aB	31.50 aB	34.87 aB	49.25 aA	31.00 aB	29.25 aB	29.25 aB	29.25 aB	32.50 aB
L+G+P/JB/S	30.00 aB	33.75 aB	30.50 aB	50.50 aA	23.75 bC	21.50 aC	21.50 aC	21.50 aC	34.00 aB

Means followed by equal letters in the column do not differ from each other by the Scott-Knott test at 5% probability. Legend: DS/B = disturbed soil until 1999, then signalgrass implantation; VB/S = velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; P/JB/S = pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+VB/S = limestone + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; L+P/JB/S = limestone + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999; L+G+VB/S = limestone + gypsum + velvet bean until 1999, then replaced by signalgrass; and L+G+P/JB/S = limestone + gypsum + pigeonpea until 1994, then replaced by jack bean, and replaced again by signalgrass from 1999. Native tree species were planted in the area after 2010.

Source: Author himself (2023).

The organic matter content increased significantly in 2008 compared to 1998 in the two soil layers. A small increase in the content was observed from 2008 to 2009 in the 0.00–0.10 m layer, remaining constant in 2010 and 2011. However, these contents are classified as low because the content should be between 16 and 30 g dm⁻³ according to Raij *et al.* (2001), confirming the characteristic of soils in the Cerrado biome.

The treatment with pigeonpea and limestone + gypsum + velvet bean showed the highest organic matter contents but there was a decrease in the content in 2009 in the 0.10–0.20 m layer, remaining constant in 2010 and 2011.

Bonini Neto *et al.* (2019) identified statistical differences between all treatments applied for soil recovery in 2010 and 2011 in all soil layers and stated that recovery treatments reached the 0.00–0.10 and 0.10–0.20 m layers because recovery treatments provided higher organic matter contents in these layers. A significant increase in soil organic matter was observed in 2022, with the highest values in treatments with velvet bean and limestone + gypsum + pigeonpea, reaching a content of 16.3 g dm⁻³ in the soil of the Cerrado according to Raij *et al.* (2001), statistically differing from the control and the treatments with pigeonpea and limestone + pigeonpea.

Table 2.6 shows the mean soil pH values in the 0.00–0.10 m layer. The highest mean pH values in 1993, 1995, 1997, and 1998 were obtained with the limestone + velvet bean treatment, statistically differing from the control and treatment with velvet bean and pigeonpea. The 0.10–0.20 m layer showed no significant difference between treatments in 1993 and 1995, but the treatment with limestone + gypsum + velvet bean differed statistically from the control (Table 2.6). The pH values for the treatments classify the acidity from high to medium (pH between 4.4 and 5.5), according to Teran *et al.* (2022).

The pH values in 2008, 2009, 2010, and 2011 decreased, on average, in most of the treatments, with no statistical differences, with the treatment with limestone + gypsum + velvet bean showing the highest pH value, remaining constant in both soil layers (Figure 2.5).

Bonini [6] demonstrated that the pH of the recovery treatments acted similarly in all layers for 2010 and 2011 and differed from the control (native vegetation of Cerrado). Cerrado soils are slightly acidic, and the recovery treatments were efficient, thus leading to a higher pH than the control (native vegetation of Cerrado). The pH in

the surface layer was due to the contribution of signalgrass in the addition of organic matter in all experimental plots.

A new decrease in pH values was identified in 2022, with the treatment with limestone + pigeonpea and limestone + gypsum + velvet bean showing the highest pH value, differing statistically from the treatment with pigeonpea in the 0.00–0.10 m layer. The treatments with limestone + pigeonpea and limestone + velvet bean had the highest pH value in the 0.10–0.20 m layer but did not differ from the other treatments. In this case, the treatments with soil correction are no longer taking effect (see response surface in Figure 2.5).

According to Oliveira *et al.* (2000), organic matter may have been mineralized and nutrients were released and absorbed by the plant. Thus, hydrogen and aluminum ions remained in the soil, which contributed to the pH reduction.

Table 2.6 shows the soil base saturation values in the 0.00–0.10 m layer. A significant difference was observed between the treatments in 1993, 1997, and 1998, with the highest content in the limestone + velvet bean treatment. No statistical difference was observed between treatments in 1995, with limestone + velvet bean and limestone + gypsum + velvet bean treatments showing the highest values.

The years 2008, 2009, 2010, and 2011 presented a decrease in the values of the sum of bases, with no statistical difference between treatments. The treatment with limestone + gypsum + velvet bean had the highest value. A decrease in the values was identified in the 0.10–0.20 m layer and the treatment with limestone + velvet bean presented the best result (Figure 2.5).

According to Siqueira (2017), the low base saturation indicates a small number of base-forming cations saturating the negative charges of colloids and most of them are neutralized by H^+ and Al^{3+} , which contributes to soil acidity.

No statistical difference was observed between treatments in 2022, with the treatment with limestone + gypsum + velvet bean showing the highest value in the 0.00–0.10 m layer and the treatment with limestone + pigeon in the 0.10–0.20 m layer.

According to Teran *et al.* (2022), fertile soil presents a base saturation (V%) higher than 50%, and lower results are found in non-fertile or low-fertility soils. The obtained values are considered low, indicating acidic soil.

2.4 Conclusions

We can conclude that over time, the recovery treatments were efficient in positively improving soil fertility. The study carried out in 2022 showed that a new anthropic intervention is necessary for the levels of soil attributes to continue to recover.

The chemical attributes were good indicators of soil quality, standing out the treatment with velvet bean as the most efficient in the degraded soil recovery. The main evolution was identified from 2008 and was very expressive in 2009.

The response surface was the method that facilitated the visualization of results over time.

REFERENCES

- ALBUQUERQUE, A. S.; FONSÊCA, N. C.; SANTOS, R. V. Aplicação de corretivos alternativos em solo salinizado com cultivo de *Sorghum bicolor* L. **Rev. Verde**, Pombal, v. 13, p. 452-458, 2018.
- ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V.; SOUZA, Z. M. Recovery of native area used for construction of hydroelectric power station **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 887-893, 2012.
- ARAUJO, K. D.; SOUZA, M. A.; SANTOS, G. R.; ANDRADE, A. P.; FERREIRA NETO, J. V. Atividade microbiana no solo em diferentes ambientes da região semiárida de Alagoas. **Geografia**, Londrina, p. 5-18, 2016.
- BAPTISTELLA, J. L. C.; BETTONI TELES, A. P.; FAVARIN, J. L.; PAVINATO, P. S.; MAZZAFERA, P. Phosphorus cycling by *Urochloa decumbens* intercropped with coffee. **Experimental Agricultura**, Campinas, v. 58, n. 36, p. 1-10, 2022.
- BONI T.; PUJOL, P. E. I.; AVELINO SANTOS, A.; RODRIGUES, C. A. M.; MALTONI, K. L. Biomass residues improve soil chemical and biological properties reestablishing native species in an exposed subsoil in Brazilian Cerrado. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 17, e0270215, 2022.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação das propriedades químicas de um solo degradado. **Rev. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 388–393, 2015.
- BONINI NETO, A.; BONINI C. S. B.; REIS, A. R.; PIAZENTIN, J. C.; COLETTA, L. F. S.; PUTTI, F. F.; HEINRICHS, R.; MOREIRA, A. Automatic Recovery Estimation of Degraded Soils by Artificial Neural Networks in Function of Chemical and Physical Attributes in Brazilian Savannah Soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, Philadelphia, v. 50, p. 1-14, 2019.

- BONINI, C. S. B.; MACIEL, T. M. S.; MOREIRA, B. R. A.; CHITERO, J. G. M.; HENRIQUE, R. L. P.; ALVES, M. C. Long-Term Integrated Systems of Green Manure and Pasture Significantly Recover the Macrofauna of Degraded Soil in the Brazilian Savannah. **Soil Syst.**, Itália, v. 7, n. 56, p. 1-10, 2023.
- CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **PUBVET**, Londrina, v. 11, p. 1036-1045, 2017.
- CORDEIRO, S. M. A.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SAGGING JUNIOR, O. J. Colonização e densidade de esporos de fungos micorrízicos em dois solos do cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, p. 147-153, 2005.
- FARDIN, F. H.; MALTONI, K. L.; BONI, T. S.; FARIA, G. A.; REZENDE, A. A. Restauração ecológica de subsolo exposto condicionado com resíduos no Cerrado. **Sci For**, Piracicaba, v. 49, n. 3452, p. 1-12, 2021.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 1039-1042, 2011.
- GIÁCOMO, R. G.; ALVES, M. C.; ARRUDA, O. G.; SOUTO, S. N.; PEREIRA, M. G.; MORAES, M. L. T. Atributos químicos de um solo degradado após aplicação de composto orgânico e crescimento de *Mabea fistulifera* Mart. **Ciência Florestal**, Santa Maria, p. 754-768, 2019.
- HOFFMANN, R. B.; LIMA, S. V.; HOFFMANN, G. S. S.; ARAÚJO, N. S. F. Efeito do uso do solo sobre a macrofauna edáfica. **Brazilian Journal of Animal Environmental Research**, Curitiba, p. 125-133, 2018.
- KITAMURA, A. E.; TAVARES, R. L. M.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery of degraded Cerrado soil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 50, p. 1-8, 2020.
- LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, Canadá, v. 7, p. 5875-5895, 2015.
- MACHADO, K. S.; MALTONI, K. L.; SANTOS, C. M.; CASSIOLATO, A. M. R. (2014). Resíduos orgânicos e fósforo como condicionantes de solo degradado e efeitos sobre o crescimento inicial de *Dipteryx alata* Vog. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, p. 541-552, 2014.
- MACHADO, P.L.O.A.; BENITES, V.M.; BOLAN, N. Liming Acidic Soils Recarbonizing global soils: A technical manual of recommended sustainable soil management. Available in: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb6595en>. Accessed in 01 jun. 2023.
- MATOS, A.M.S.; BONINI, C.S.B.; MOREIRA, B.R.A.; ANDREOTTI, M.; HEINRICHS, R.; SILVA, D.T.; SOUZA, J.A.L.; SANTOS, M.A.; ANDRIGHETTO, C.; PAVAN, G.M.; BARRETTO, V.C.M.; NETO, A.B. Long-Term Integrated Crop–Livestock–Forestry Systems Recover the Structural Quality of Ultisol Soil. **Agronomy**, v. 12, n. 2961, p. 1-10, 2022.

MIZOBATA, K. K. G. S. **Alterações de atributos físicos de subsolo revegetado e condicionado com resíduos, para recuperação de ambiente degradado no cerrado**. 2017. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2017.

MOTA, J. F.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, F.; SALMERÓN-SÁNCHEZ, E.; MENDOZA-FERNÁNDEZ, A. J.; PÉREZ-GARCÍA, F. J.; MERLO, M. E. Spontaneous Primary Succession and Vascular Plant Recovery in the Iberian Gypsum Quarries: Insights for Ecological Restoration in an EU Priority Habitat. **Plants**, Canadá, v. 12, n. 1162, p. 1-16, 2023.

NETO, A. B.; BONINI, C. D. S. B.; BISI, B. S.; DOS REIS, A. R.; COLETTA, L. F. S. Artificial neural network for classification and analysis of degraded soils. **IEEE Lat. Am. Trans.**, New York, v. 15, p. 503–509, 2017.

OLIVEIRA, I. P.; CUNHA, R.; SANTOS, R. S. M.; FARIA, C. D.; CUNHA, G. F. Efeito da correção da fertilidade do solo no desenvolvimento da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em latossolo com diferentes históricos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 57-64, 2000.

PRACH, K.; WALKER, L. R. Four opportunities for studies of ecological succession. **Trends Ecol. Evol.**, Uberlândia, v. 26, p. 119–123, 2011.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC: São Paulo, Brasil, 2001.

ROSOLEM, C. A.; MERLIN, A.; BULL, J. C. L. Soil phosphorus dynamics as affected by Congo grass and P fertilizer. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 309–315, 2014.

ROSSI, C. Q.; PINTO, L. A. S. R.; MOURA, O. V. T.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Soil organic matter in biogenic, intermediate and physicogenic aggregates under agroecological management. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 36, p. 167–176, 2023.

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Brazilian system of soil classification**. 5th ed. Embrapa: Rio de Janeiro, 2018, 286 p.

SILVA, J. H. C. S., BARBOSA, A. S., GOMES, D. S., AQUINO, I. S., SILVA, J. R. Dynamics of plant organic matter decomposition in different agricultural landscapes. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 36, p. 135 –144, 2023.

SILVA, M.O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, p. 47838-47855, 2020.

SIQUEIRA, C. C. Z. **Atributos do solo e estoques de carbono em sistemas agroflorestais na restauração de áreas degradadas**. 2017. 64 f. Dissertação (Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2017.

SOUTO FILHO, S. N.; ALVES, M. C.; MONREAL, C. M.; BONINI, C. S. B. Nanoparticles and nanostructure morphology of a Red Latosol in rehabilitation.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, p. 530-536, 2017.

TERAN, F. J. C.; OLIVEIRA SANTOS, G.; JÚNIOR, W. T.; FREITAS, E. C. B.; SOARES, J. A. Avaliação da recuperação de áreas degradadas por exploração de cascalho laterítico por meio da incorporação de lodo de esgoto. Estudo de caso no Distrito Federal. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 5, p. 2973-2984, 2022.

UNESP. Universidade Estadual Paulista. Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira - Área de Hidráulica e Irrigação. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CAPÍTULO 3 - RECUPERAÇÃO DO SOLO EM PROCESSO DE REABILITAÇÃO HÁ 30 ANOS SOB ESPÉCIES DE COBERTURA DO SOLO

RESUMO

A intervenção antrópica sobre a camada superficial do solo, por meio da remoção do solo e da cobertura vegetal em obras de engenharia, tem resultado em extensas áreas degradadas. Com o objetivo de avaliar a reabilitação da cobertura vegetal de um Latossolo Vermelho distrófico, que está em processo de recuperação há 30 anos, em uma área experimental em Selvíria/MS. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, utilizando o tempo como parcela subdividida, com quatro repetições e constituído por sete tratamentos, sendo eles: Solo mobilizado (vegetação espontânea); Mucuna-preta (MP); Guandu (G) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (FP); Calcário+MP; Calcário+G até 1994, após substituído por FP; Calcário+Gesso+MP; Calcário+Gesso+G até 1994, após substituído por FP, em 1999 todos os tratamentos foram cultivados com braquiária (*Urochloa decumbens*). Foi realizado um levantamento florístico para identificação e quantificação das espécies arbóreas espontâneas, sendo mensurados o diâmetro à altura do solo, o diâmetro à altura do peito, a altura e foi calculada a taxa de crescimento. Os dados revelam a identificação de dezesseis espécies de plantas previamente desconhecidas. Em 2013, o total de 142 espécies aumentou significativamente para 828 em 2023. Em outras palavras, ao longo de uma década, observou-se um crescimento extraordinário de mais de 100% nesse aspecto. Dentre as vinte e duas espécies catalogadas que passaram por regeneração natural dentro da área experimental, observou-se que o Jacarandá-do-campo (*Machaerium acutifolium* Vogel) destacou-se como a espécie mais adaptada. Em seguida, ficaram a Murici (*Byrsonima* sp.), a Roseira do campo (*Lippia lupulina* Cham.) e a Lixeira (*Curatella americana*). Conclui-se que os tratamentos desempenharam um papel significativo na recuperação do solo, resultando na identificação de vinte e duas espécies catalogadas no ano atual, sendo que o desenvolvimento mais pronunciado das plantas foi no tratamento com calcário+mucuna-preta.

Palavras-chave: revegetação; dinâmica sucessional; *Urochloa decumbens*; matéria orgânica; solo decapitado.

ABSTRACT

Anthropogenic intervention on the surface layer of the soil, through the removal of soil and vegetation cover in engineering works, has resulted in extensive degraded areas. With the objective of evaluating the rehabilitation of the vegetation cover of a dystrophic Red Oxisol, which has been in the recovery process for 30 years, in an experimental area in Selvíria/MS. The experimental design was in randomized blocks, using time as a subdivided plot, with four replications and consisting of seven treatments, namely: Mobilized soil (spontaneous vegetation); Mucuna-preta (MP); Guandu (G) until 1994, after being replaced by Feijão-de-porco (FP); Limestone+MP; Calcário+G until 1994, after being replaced by FP; Limestone+Gypsum+MP; Limestone+Gypsum+G until 1994, after being replaced by FP, in 1999 all treatments were cultivated with brachiaria (*Urochloa decumbens*). A floristic survey was carried out to identify and quantify the spontaneous tree species, measuring the diameter at ground height, diameter at breast height, height and the growth rate was calculated. The data reveals the identification of sixteen previously unknown plant species. In 2013, the total of 142 species increased significantly to 828 in 2023. In other words, over the course of a decade, an extraordinary growth of more than 100% in this aspect was observed. Among the twenty-two cataloged species that underwent natural regeneration within the experimental area, it was observed that the Jacaranda-do-campo (*Machaerium acutifolium* Vogel) stood out as the most adapted species. Next were Murici (*Byrsonima* sp.), Roseira do campo (*Lippia lupulina* Cham.) and Lixeira (*Curatella americana*). It is concluded that the treatments played a significant role in soil recovery, resulting in the identification of twenty-two species cataloged in the current year, with the most pronounced development of plants being in the treatment with limestone+black mucuna.

Keywords: revegetation; successional dynamics; *Urochloa decumbens*; organic matter; soil degradation.

3.1 Introdução

Os solos são frequentemente degradados pelo ser humano, sendo que cerca de um terço desse recurso natural já apresenta níveis moderados a altos de

degradação. Isso ocorre devido ao uso inadequado, que causa principalmente a perda da matéria orgânica, compactação e desequilíbrio dos nutrientes presentes no solo (MENDES *et al.*, 2018; BEDNÁŘ, ŠARAPATKA, 2018).

O solo tem sido degradado por vários fatores, e a intensa urbanização das cidades tem contribuído para esse problema. Além disso, a ampliação das atividades industriais e agrícolas tem aumentado a necessidade de energia no país. Para atender a essa demanda, foram construídas várias usinas hidrelétricas, sendo uma delas localizada entre os municípios de Ilha Solteira (SP) e Selvíria (MS). Essa usina também tem causado impactos ambientais significativos na região (ADEDEJI *et al.*, 2020; BERTÃO; RICARDI; LIMA, 2019).

O Brasil é um dos principais construtores de barragens no mundo e ocupa a segunda posição em geração de energia hidrelétrica, atrás apenas da China. A hidroeletricidade é responsável por 12,6% do consumo total de energia do país e 68,1% da eletricidade produzida. Embora seja considerada uma fonte mais favorável ao meio ambiente em comparação a outras opções devido ao uso de recursos naturais renováveis e não poluentes, a formação de reservatórios implica em vários impactos ambientais (OLIVEIRA, 2018).

Na implantação de usinas hidrelétricas, há uma grande preocupação em relação aos impactos socioeconômicos, culturais e ambientais que podem prejudicar a fauna, a flora e a comunidade ribeirinha local (CRUZ *et al.*, 2016). De acordo com Souto Filho *et al.* (2017), a construção da usina pode levar a uma degradação significativa das áreas circundantes, causando um desequilíbrio entre a litosfera, a hidrosfera e a biosfera. Esses efeitos são particularmente intensos em áreas de empréstimo, encostas instáveis e áreas alagadiças.

Para Carvalho *et al.* (2017), a restauração de áreas degradadas é uma abordagem essencial para reestabelecer as características originais do solo e controlar a degradação ambiental. Esse processo pode ser alcançado por meio da realização de estudos sobre a estrutura das comunidades e a avaliação da capacidade de resiliência do ecossistema. Para tanto, existem duas abordagens principais: métodos diretos que utilizam práticas mecânicas e químicas, e métodos indiretos que utilizam espécies vegetais para potencializar o processo de recuperação. A escolha do método mais adequado depende das condições específicas de cada área degradada e das metas de restauração estabelecidas.

Segundo Yirdaw *et al.* (2019), a composição florística inicial de uma área em recuperação, sem intervenção humana, é em grande parte determinada pela dispersão de espécies por meio de vetores naturais, rebrota de tocos e regeneração a partir do banco de sementes presente no solo. No entanto, em áreas degradadas com baixa resiliência, o retorno ao estado anterior pode não ocorrer ou ser extremamente lento. Nesses casos, técnicas de recuperação do solo são necessárias, como a utilização de espécies adequadas às novas condições edáficas.

O conhecimento da sucessão natural de uma área é crucial para a escolha de espécies vegetais na recuperação do solo degradado, sendo mais importante do que simplesmente classificar cada espécie em grupos ecológicos. Além de ser adequada às condições locais, a espécie escolhida deve possuir um alto grau de interação biótica, o que acelera a restauração ambiental e favorece a diversidade de espécies (KUPREEV *et al.*, 2019; LONDE, FERREIRA, MARTINS, 2022).

Ao escolher espécies vegetais para auxiliar na regeneração de solos degradados, é importante considerar sua capacidade de adaptação a ambiente com condições adversas, bem como as práticas de manejo e o clima da região. A Braquiária (*Urochloa decumbens*), por exemplo, é frequentemente utilizada na recuperação de áreas degradadas devido à sua capacidade de adaptação a diferentes tipos de solo e sua tolerância a locais com baixa fertilidade. Além de colonizar as áreas em recuperação, essas plantas podem facilitar o surgimento de novas espécies e contribuir para a restauração da biodiversidade local (DAMENE, BAHIR, VILLAMOR, 2020; HABERMANN, DE OLIVEIRA, BARRETO, 2021).

O gênero *Urochloa decumbens* é amplamente cultivado como forrageira tropical em todo o mundo e tem sido uma grande expansão no Brasil. Essa forrageira possui características vantajosas em relação a outros gêneros, tais como grande adaptabilidade a solos ácidos com baixa fertilidade e alta produção de matéria seca. Além disso, destaca-se pela sua extraordinária tolerância à seca, permanecendo verde durante o período de estiagem. A Brachiaria também é resistente ao frio (exceto geadas), fogo e pisoteio, além de ter uma boa tolerância à variações de umidade (SILVA *et al.*, 2020).

O uso de espécies vegetais específicas, como gramíneas, leguminosas e culturas forrageiras, tem sido amplamente utilizado em programas de recuperação de áreas degradadas. Ao combinar as espécies nativas do local com aquelas que

acelerem o equilíbrio químico e físico do solo, é possível acelerar o processo de recuperação. Além disso, é importante ressaltar que a dispersão das sementes é facilitada quando a área a ser recuperada está próxima de uma área com vegetação nativa, o que aumenta a eficiência do processo de recuperação (EDRISI; EL-KEBLAWY; ABHILASH, 2020 e PAGOTO; MASSI; COLLARD, 2022).

Vários estudos têm avaliado os efeitos da adubação verde nos atributos do solo, especialmente na recuperação de solos degradados. Esses estudos confirmam que a adubação verde ajuda a melhorar a anatomia física e bioquímica do solo, prevenindo a perda de nutrientes por lixiviação. Além disso, ela aumenta a capacidade de retenção de água no solo e estimula a atividade microbiana (MAITRA *et al.*, 2018 e FONSECA; MARTINS; VILLA, 2023).

Outro fato que melhora a anatomia do solo, consiste na aplicação de calagem e a gessagem, contribuindo para um desenvolvimento mais robusto das plantas forrageiras. Essas práticas não apenas reduzem a acidez do solo, mas também ampliam a disponibilidade de nutrientes, beneficiando o crescimento do sistema radicular das plantas. A calagem, ao corrigir deficiências de cálcio e magnésio, eleva o pH do solo, mitigando a toxicidade de alumínio para o sistema radicular (Friesem *et al.*, 2019).

A calagem corrige a subsuperfície do solo, enquanto a aplicação de gesso se estende para camadas mais profundas. O sulfato presente no gesso movimenta-se para o subsolo em conjunto com cátions, especialmente o cálcio, corrigindo a acidez em camadas mais profundas e reduzindo os níveis de alumínio. Esse processo favorece o aprofundamento das raízes, conferindo às plantas maior resistência à escassez de água (LANCASTER, 2021).

A incorporação de uma cobertura vegetal no início do processo de restauração de áreas degradadas é fundamental para a redução significativa das perdas de solo. Além disso, essa prática contribui para a melhoria da estruturação do solo e o aumento da atividade microbiana. Dentre os diversos fatores ambientais que influenciam na recuperação, destaca-se a umidade proporcionada pela cobertura vegetal, que acelera o processo de regeneração (NURFAEIZA *et al.*, 2022).

Ao avaliar a macrofauna edáfica em uma área previamente degradada pela construção de uma Usina Hidrelétrica e em processo de recuperação por meio do uso de espécies vegetais, constatou que o tratamento com *Astronium fraxinifolium*+*Brachiaria decumbens*+lodo de esgoto proporcionou um aumento de

aproximadamente 4 a 6 vezes na população de macrofauna do solo em relação aos demais tipos de cobertura avaliados, após três anos de acompanhamento (KITAMURA *et al.*, 2020).

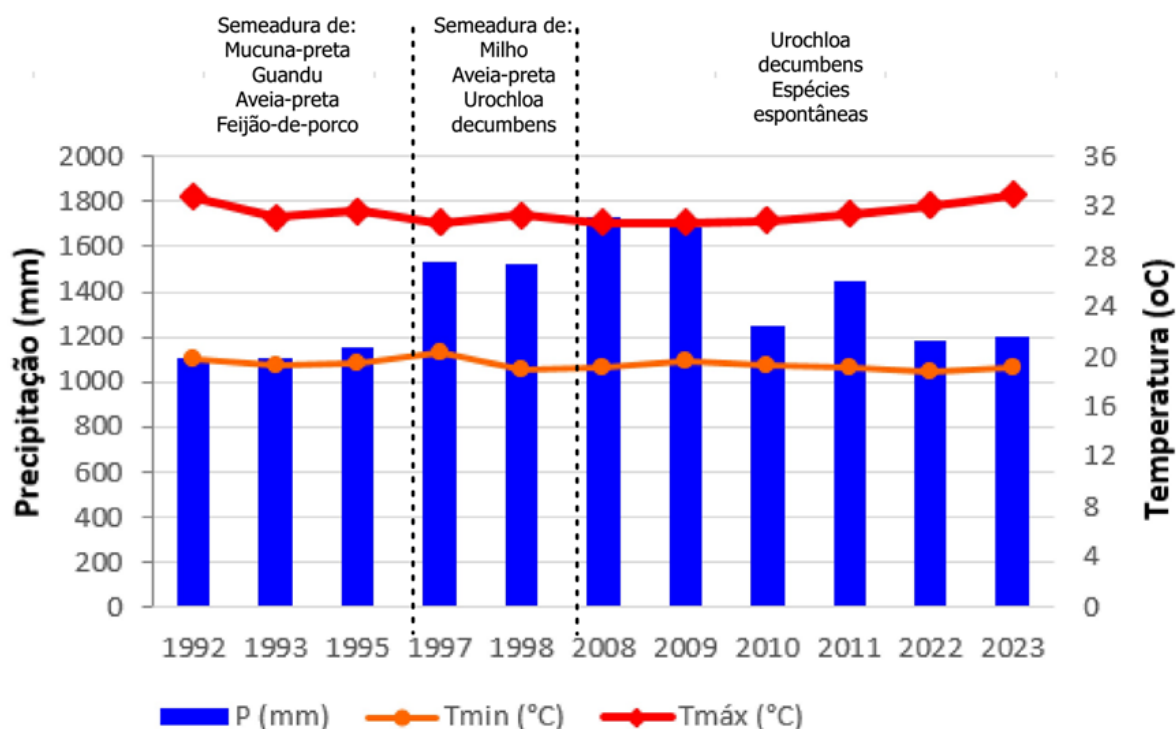
Com isso, o objetivo foi avaliar a reabilitação de um Latossolo Vermelho distrófico que sofreu decapitação e está em processo de recuperação há 30 anos, por meio da observação da sucessão ecológica de espécies arbóreas nativas do cerrado.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp, no município de Selvíria/MS - Brasil, situada entre as coordenadas 20°22' de latitude Sul e 51°22' de longitude Oeste, e altitude em torno de 327 metros acima do nível do mar, onde a temperatura média anual é de 23,5 °C e a precipitação média anual de 1370 mm. Os solos característicos da região de estudo são de textura franco argilo-arenosa e rico em sesquióxidos, e classificados como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018) e segundo a Soil Survey Staff (2014), um Oxisol.

O tipo climático da região é classificado como Aw de acordo com Koppen (1990), com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso. A região apresenta uma precipitação média anual de 1370 mm, temperatura média anual é de 23,5 °C e umidade relativa do ar entre 70-80% (média anual) (Figura 3.1). Os solos na região são predominantemente de textura franco argilo-arenosa e rico em sesquióxidos, classificados como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018) ou Oxisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Figura 3.1 - Precipitação total anual e temperatura média anual do Município de Selvíria-MS.



Fonte: UNESP (2023); Próprio autor (2023).

Na área em estudo foi retirado uma camada de 8,6 metros do perfil do solo original (Figura 3.2), para a terraplanagem e fundação da barragem para construção da usina Hidrelétrica de Ilha Solteira-SP, que teve início na década de 60, sendo que o subsolo estava exposto desde 1969, dando origem a uma área degradada (ALVES; NASCIMENTO; SOUZA, 2012).

No ano de 1992, o subsolo apresentava-se com compactação superficial e baixa presença de vegetação espontânea. Nesse mesmo ano iniciou o trabalho de recuperação, e o preparo do solo foi realizado efetuando-se uma subsolagem que atingiu uma profundidade média de 0,40m na área em estudo.

Durante o período de pesquisa, o solo foi preparado por meio de aração, utilizando um arado de aivecas tracionado por um trator de 110 cv. Posteriormente, uma gradagem niveladora foi realizada com uma grade de arrasto acoplada a um trator de 85cv. Foi realizada a caracterização físico-química da área que está apresentada na Tabela 3.1.

A semeadura das espécies foi conduzida manualmente, enquanto os sulcos foram criados por um conjunto composto por um trator de 75cv e um sulcador. Os

sulcos apresentavam dimensões de aproximadamente 0,50m entre linhas e 0,15m de profundidade.

A densidade de semeadura dos adubos verdes foi estabelecida em 10 plantas por metro linear. A correção do solo foi baseada na caracterização química da área experimental. A aplicação de calcário para atingir uma saturação por bases de 70% foi realizada com 18,5kg de calcário por parcela (parcelas com calcário apenas). Nas parcelas com calcário e gesso, ocorreu a substituição de 20% do CaO do calcário pelo CaO do gesso, aplicando 5,2 kg de gesso e 13,8 kg de calcário por parcela, ambos incorporados no solo. O calcário dolomítico com PRNT de 70% foi utilizado.

Em 1996, a correção do solo foi novamente realizada com base em análises químicas, especialmente para os tratamentos com calcário e calcário mais gesso. A substituição de CaO do calcário pelo CaO do gesso seguiu o mesmo procedimento do início do experimento. A correção foi implementada nos casos em que a saturação por bases estava abaixo de 60%, visando elevar esse índice para 70%.

Nos anos de 1992 a 1996 foram manualmente semeadas em dezembro-janeiro espécies de adubos verdes (mucuna-preta, guandu, aveia-preta e feijão-de-porco). E nos anos de 1997, 1998 e 1999 foram semeadas a cultura do milho (*Zea mays*), a aveia-preta (*Avena strigosa*) e a braquiária (*Urochloa decumbens*), respectivamente.

Em 2006, começaram a aparecer naturalmente espécies arbóreas nativas de cerrado, como indicadores de qualidade do Latossolo Vermelho distrófico. Nos anos de 2008 a 2012 foram estudados alguns atributos físicos e químicos do solo; massa seca da braquiária e a altura e diâmetro dessas espécies. A partir de 2014 até o momento, a área encontra cultivada com *Urochloa decumbens* (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

Em todos os períodos estudados foram realizados registros fotográficos que estão apresentados na Figura 3.3 que são importantes para fazer as relações com os dados de solo deste trabalho.

Figura 3.2 - Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,6 m de espessura.



Fonte: Bonini (2012).

Tabela 3.1 - Caracterização inicial (1992).

Prof	Presina	M.O.	pH (CaCl ₂)	K	Ca	Mg	H+Al	S	CEC	V
metros	mg.dm ⁻³	g.dm ⁻³			mmol _c .dm ⁻³			mg.dm ⁻³		%
0.00-0.20	1	7.0	4.0	0.2	2.0	1.0	20.0	3.2	23.2	14
0.20-0.40	0	4.0	4.2	0.2	2.0	1.0	20.0	3.2	23.2	14

Fonte: (Alves, 2001).

Figura 3.3 - Registro fotográfico da área experimental de 1992 a 2023.



Fevereiro/1992



Fevereiro/1993



Março/1997



Julho/1998



Julho/1999



Outubro/2006



Janeiro/2009



Outubro/2013



Janeiro/2022



Março/2023

Fonte: Alves (2011); Bonini (2015); Rosa (2014); Próprio autor (2023).

Para o delineamento experimental foi utilizado parcelas de 10m x 10m, em blocos casualizados com espaçamento de 2m entre si, utilizando a variação dos tratamentos em função do tempo, esquema de parcela subdividida, tendo a aplicação de sete tratamentos com quatro repetições, sendo eles descritos a seguir: SM/B = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/B = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/B = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/B = Calcário + Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/B = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/B= Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/B= Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*. Após 2006 iniciou o povoamento natural de espécies arbóreas nativas na área.

Para o acompanhamento do desenvolvimento das espécies que surgiram de forma espontânea, dentro das parcelas, foi realizado um levantamento florístico na área experimental, de acordo com Lorenzi e Souza (2007). As espécies foram identificadas, quantificadas e mensurados as medições das variáveis dendrométricas de diâmetro à altura do solo (DAS) e diâmetro à altura do peito (DAP) e altura, nos anos de 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 e 2023.

As plantas novas foram identificadas e incluídas na planilha existente de trabalhos anteriores. O diâmetro das plantas e a medida da base foram mensurados com a utilização de um paquímetro a 1,30 m acima do nível do solo. A altura das plantas foi obtida por meio do uso do aparelho hipsômetro, tomando como base a gema apical das plantas (Figura 3.4).

Foi realizada a determinação da taxa de crescimento anual das plantas da área experimental, pela Equação 3.1.

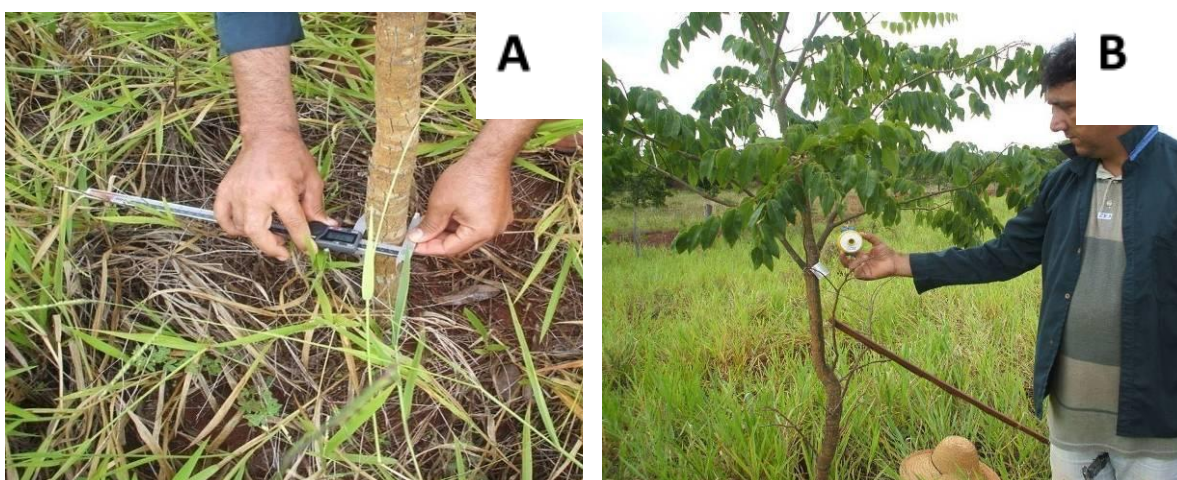
$$\text{Taxa de crescimento} = \frac{\text{valor da última avaliação} - \text{valor da 1ª avaliação}}{\text{nº de dias entre a 1ª e a última avaliação}}. 365$$

(Equação 3.1)

Sendo que o número de dias entre a primeira e a última avaliação = 5628 dias acumulados (2007 a 2023 = 16 anos).

Os dados de taxa de crescimento das espécies não foram analisados estatisticamente porque as mesmas surgiram espontaneamente na área e, a sua maior ocorrência provavelmente, está associada com a direção do vento dominante e à proximidade com a planta-matriz.

Figura 3.4 - A: Medição do diâmetro do caule das espécies arbóreas e B: Medição da altura das espécies arbóreas.



Fonte: Bonini (2012).

3.3 Resultados e Discussão

Com o levantamento florístico realizado na área experimental, foi verificada a presença de espécies nativas espontâneas a partir de 2007, que evoluíram de maneira constante, havendo 88 plantas nesse primeiro ano, que passaram a ser 90 plantas no ano de 2008, um pequeno aumento.

Nos anos de 2010 e 2011 a evolução se manteve pequena, possivelmente por conta de ter sido um ano mais seco (Figura 3.1). Entretanto, no ano de 2012 se mostrou mais expressiva, com um aumento de 38 novas plantas em apenas um ano. No ano de 2023 esse aumento foi muito mais expressivo, em uma década surgiram 596 novas plantas, uma vez que, passou de 142 plantas no ano de 2013 para 828 plantas em 2023, em média teríamos um aumento de 69 plantas por ano (Tabela 3.2). Vale ressaltar que os anos mais úmidos, 2015 e 2017, estão compreendidos neste intervalo e podem ter contribuído para o desenvolvimento das espécies, visto

que, os anos de 2022 e 2023 apresentaram características semelhantes ao ano de 2010.

No ano de 2008 as duas espécies de *Solanum lycocarpum* (Lobeira) não estavam mais presentes na área, mas houve o surgimento da espécie *Curatella americana* L. (Lixeira), da família Dilleniaceae (BONINI, 2010). No ano de 2012 foram quatro novas espécies a surgirem (6 plantas), sendo um *Jacaranda brasiliana* (Jacarandá caroba), um *Byrsonima* sp. (Murici), um *Aegiphila verticillata* Vell. (Tamanqueiro-do-cerrado) e três *Solanum lycocarpum* (Lobeira). No ano de 2013 houve um aumento de duas novas plantas, em relação ao ano anterior, sendo que uma delas foi o surgimento da espécie de Vinhatoco.

E no ano de 2023 as três espécies de *Solanum lycocarpum* (Lobeira) e uma de *Aegiphila verticillata* Vell. (Tamanqueiro-do-cerrado) não estavam mais presentes na área, mas houve o surgimento de dezesseis novas espécies (43 plantas), sendo três Araticum-rasteiro, um Bacupari-rasteiro, nove Barbatimão, um Cabelo-de-nego, um Camboatá, quatro Caqui-do-cerrado, três Copaíba, dois Gonçalo-alves, um Guaçatonga, um Marmelo, quatro Marmelo-de-cachorro, dois Moricisão, dois Papagaieiro, um Pequiizeiro, sete Pimenta-de-macaco e um Sansão-do-campo (Tabela 3.2 e Figura 3.5).

O desaparecimento de algumas espécies botânicas (*Solanum lycocarpum* e *Aegiphila verticillata* Vell.) pode ocorrer em função do aumento da produtividade do local, impulsionada principalmente pela fertilização/correção, pelo menos em pastagens antropogênicas (SERRANO *et al.*, 2021). No entanto, mesmo com o desaparecimento dessas espécies, no ano de 2023 houve maior diversidade de plantas na parcela do bloco 4, que recebeu o tratamento com calcário+gesso+guandu (9 espécies), que segundo Gastauer *et al.* (2019) ocorre em função da melhoria nos processos ecossistêmicos ao longo de gradientes sucessionais que variam de décadas a séculos.

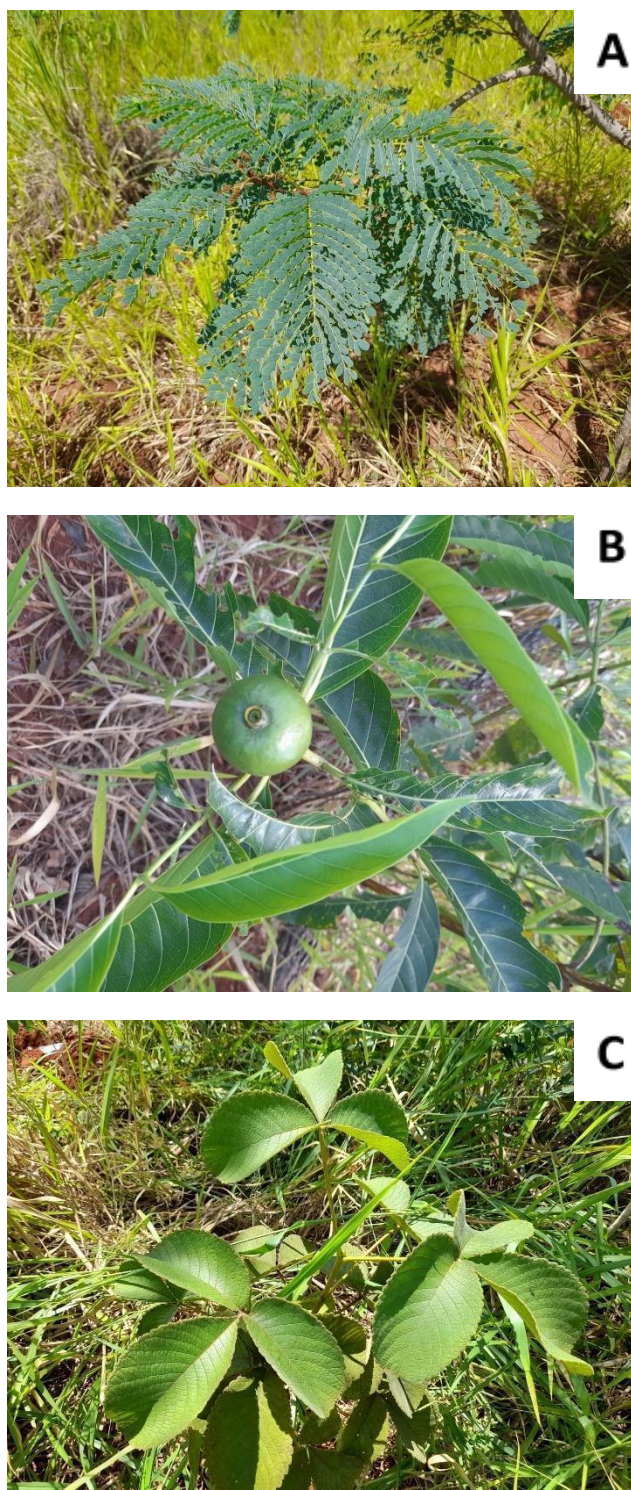
Tabela 3.2 - Levantamento florístico de todas as espécies arbóreas presentes na área.

Espécies	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2023
Araticum-rasteiro (<i>Annona pygmaea</i>)	-	-	-	-	-	-	-	3
Bacupari-rasteiro (<i>Rheedia gardneriana</i>)	-	-	-	-	-	-	-	1
Barbatimão (<i>Stryphnodendron adstringens</i>)	-	-	-	-	-	-	-	9
Cabelo-de-nego (<i>Erythroxylum suberosum</i>)	-	-	-	-	-	-	-	1
Camboatá (<i>Matayba guianensis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	1
Caqui-do-cerrado (<i>Diospyros hispida</i>)	-	-	-	-	-	-	-	4
Copaíba (<i>Copaifera langsdorffii</i>)	-	-	-	-	-	-	-	3
Gonçalo-alves (<i>Astronium fraxinifolium</i>)	-	-	-	-	-	-	-	2
Guaçatonga (<i>Casearia sylvestris</i>)	-	-	-	-	-	-	-	1
Jacarandá-do-campo (<i>Machaerium acutifolium</i>)	85	88	86	91	100	131	130	657
Jacarandá-caroba (<i>Jacaranda caroba</i>)	-	-	-	-	-	1	1	18
Lixeira (<i>Curatella americana</i>)	-	1	1	2	1	2	3	28
Lobeira (<i>Solanum lycocarpum</i>)	2	-	-	-	-	3	3	-
Marmelo (<i>Cydonia oblonga</i> Mill)	-	-	-	-	-	-	-	1
Marmelo-de-cachorro (<i>Alibertia sessilis</i>)	-	-	-	-	-	-	-	4
Moricisão (<i>Birsonia verbascifolia</i>)	-	-	-	-	-	-	-	2
Murici (<i>Byrsonima</i> sp.)	-	-	-	-	-	1	2	49
Papagaeiro (<i>Maytenus robusta</i>)	-	-	-	-	-	-	-	2
Pequizeiro (<i>Caryocar coriaceum</i> Wittm.)	-	-	-	-	-	-	-	1
Pimenta-de-macaco (<i>Xylopia aromática</i> Mart.)	-	-	-	-	-	-	-	7
Roseira-do-campo (<i>Lippia lupulina</i> Cham.)	1	1	1	1	1	1	1	31
Sansão-do-campo (<i>Mimosa caesalpinhiifolia</i> Benth.)	-	-	-	-	-	-	-	1
Tamanqueiro-do-cerrado (<i>Aegiphila lhotzkiana</i>)	-	-	-	-	-	1	1	-
Vinhático/Amarelinho (<i>Plathymentia Reticulata</i>)	-	-	-	-	-	-	1	2
TOTAL	88	90	88	94	102	140	142	828

Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.5 - Três das dezesseis novas espécies encontradas na área experimental.

A: Barbatimão. B: Marmelo-de-cachorro. C: Pequi.



Fonte: Próprio autor (2023).

Das espécies que se regeneraram naturalmente na área de estudo, 586 são *Machaerium acutifolium* (Jacarandá-do-campo), espécie leguminosa que pertence à

Família Fabaceae, sendo esta considerada essencial para o sucesso da recuperação de uma área degradada, pela sua rusticidade e alta capacidade de adicionar matéria orgânica ao solo (VIVEIROS *et al.*, 2021). A abundância desses indivíduos é favorecida pelo seu processo de dispersão anemocórica de sementes, que são produzidas em grande quantidade (COSTA; BERTOLINO; BARROS, 2021).

Os representantes da Família Fabaceae são os preferidos para a adubação verde, devido a sua alta capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, significando uma alternativa para o fornecimento de nutrientes para as plantas, com considerável potencial de produzir biomassa rica em nutrientes e capacidade de manter, ou até mesmo aumentar, o teor de matéria orgânica do solo (VIEIRA *et al.*, 2020 e SERRANO *et al.*, 2021).

Rosa *et al.* (2014) relatou sobre o possível efeito da alelopatia, da braquiária na área degradada, se relaciona com a morte de plantas, antes de ganharem tamanho para serem mensuradas. Uma vez que, esse efeito pode se apresentar de modo direto ou indireto, inibitório ou benéfico de uma planta sobre outra, via produção de compostos químicos que são liberados no ambiente. Entretanto, para confirmar a relação com esse efeito seria necessário um período superior a cinco anos de observação do local.

Bohm *et al.* (2021) estudou o efeito de palhadas de capim braquiária em diferentes proporções sobre o crescimento inicial de almeirão, visto que, quando se trata de alelopatia, o crescimento das raízes é mais sensível à presença de aleloquímicos. É possível que em grandes proporções, as palhadas de braquiária liberem compostos aleloquímicos, que interferem no metabolismo da germinação e comprometem o crescimento inicial de outras plantas.

E de acordo com Costa, Bertolino e Barros (2021), devido ao processo de sucessão ecológica, algumas espécies desaparecem e outras são agregadas ao sistema na medida em que ocorrem modificações estruturais na biocenose, alterando dessa forma a composição florística.

A área em recuperação, atualmente, apresenta uma densidade de 2.957 indivíduos ha⁻¹ ((10.000 m² * 828 plantas) / 2800 m²) de 22 espécies diferentes, ou seja, ainda não está totalmente recuperada de acordo com Durigan *et al.* (2011), visto que na área de Cerrado deve haver uma diversidade de 30 espécies de plantas lenhosas.

O surgimento das dezesseis novas espécies possivelmente se deu porque houve a dispersão das sementes dessas espécies, fazendo com que elas chegassem ao local do experimento. A condição físico-química do solo em recuperação, após a prática de adubação verde ao longo de sete anos, também contribuiu para o aparecimento das espécies, pois promoveu a recuperação da fertilidade do solo, o aumento de matéria orgânica e a capacidade de troca catiônica.

Em relação a dispersão de indivíduos na área, provavelmente por ação de animais e do vento dominante que carregou sementes para dentro da área, o maior número de plantas surgiu no bloco I com 253 indivíduos, e no bloco III com 211 plantas. No ano de 2013 os blocos I e II que apresentaram o maior número de indivíduos, estando o bloco II com 83 e o bloco I com 35 plantas, provavelmente pela possível matriz da espécie Jacarandá-do-campo (*Machaerium acutifolium* Vogel) estar localizada bem no entorno da área e ficar mais próxima desses blocos (Figura 3.6). A capacidade de recuperação em 2023 já aumentou o número de plantas e de espécies no bloco III, havendo uma diferença de apenas 15 plantas entre os blocos II e III.

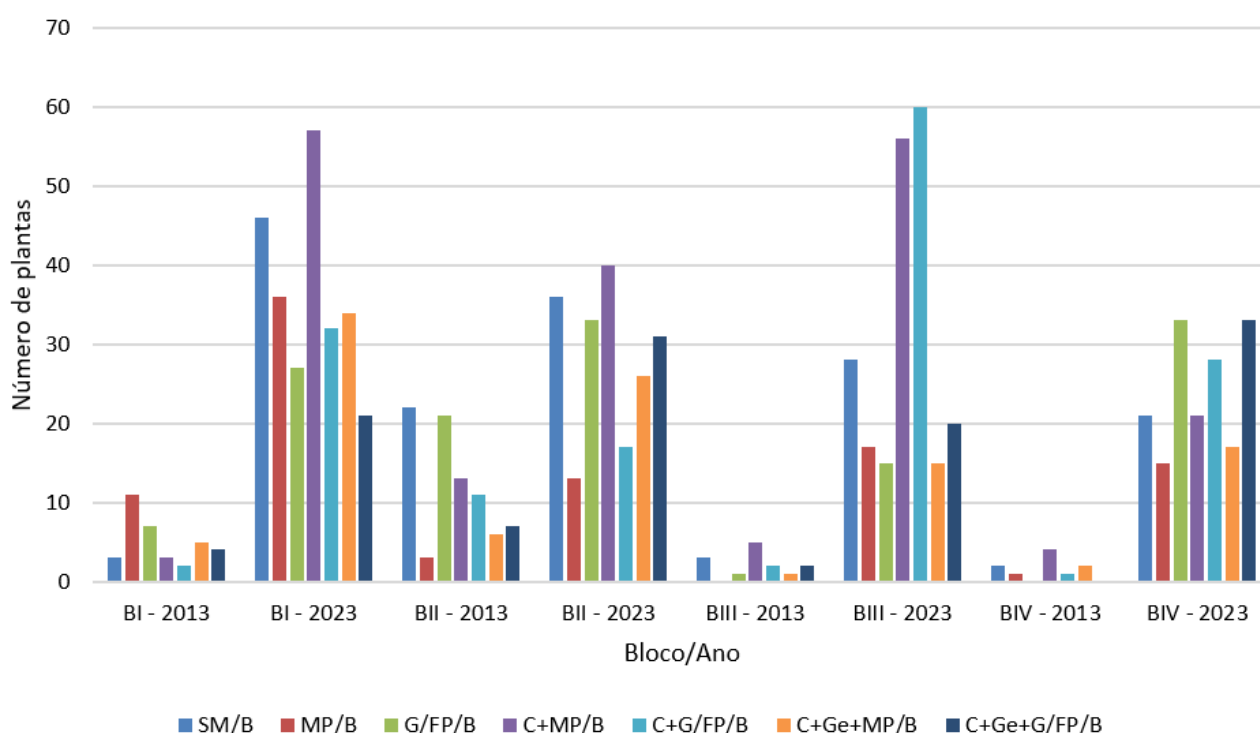
A interferência do homem, bem como, o isolamento da área contribuiu de maneira positiva para a recuperação da área, que apresenta uma boa condição, saindo do estágio inicial para o estágio intermediário, visto que desapareceram algumas pioneiras e a área foi povoada com espécies não-pioneiras, consideradas neste trabalho, as espécies que se classificam como secundárias iniciais e secundárias tardias para este grupo (Tabela 3.3) (LONDE; FERREIRA; MARTINS, 2022).

Com relação à dispersão de indivíduos em função do tratamento aplicado, no ano de 2023 as parcelas que receberam tratamento com calcário+mucuna apresentaram o maior número de novas espécies nos blocos I e II. No bloco III o tratamento que apresentou o maior número de plantas foi calcário+guandu, enquanto que no bloco IV os dois melhores tratamentos foram guandu e calcário+gesso+guandu (Figura 3.6).

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam as espécies espontâneas que surgiram na área em recuperação, que foram identificadas nos anos de 2007, 2013 e 2023, sua distribuição espacial dentro de cada parcela, com o tratamento aplicado em cada bloco de repetição. No ano de 2007 a maioria das plantas surgiram no bloco II (57 indivíduos) e se concentraram na testemunha e no tratamento guandu. Em 2013

o bloco II se manteve com o maior número de indivíduos no tratamento com guandu, enquanto que no bloco I o maior número de plantas foi encontrado no tratamento com mucuna-preta. E no ano de 2023 o maior número de indivíduos surgiu nos blocos I e III, nas parcelas que receberam o tratamento com calcário+mucuna-preta e calcário+guandu, respectivamente. A evolução cronológica dos anos descritos está apresentada na Figura 3.10.

Figura 3.6 - Número de todas as espécies arbóreas encontradas por tratamento e por bloco na área degradada.



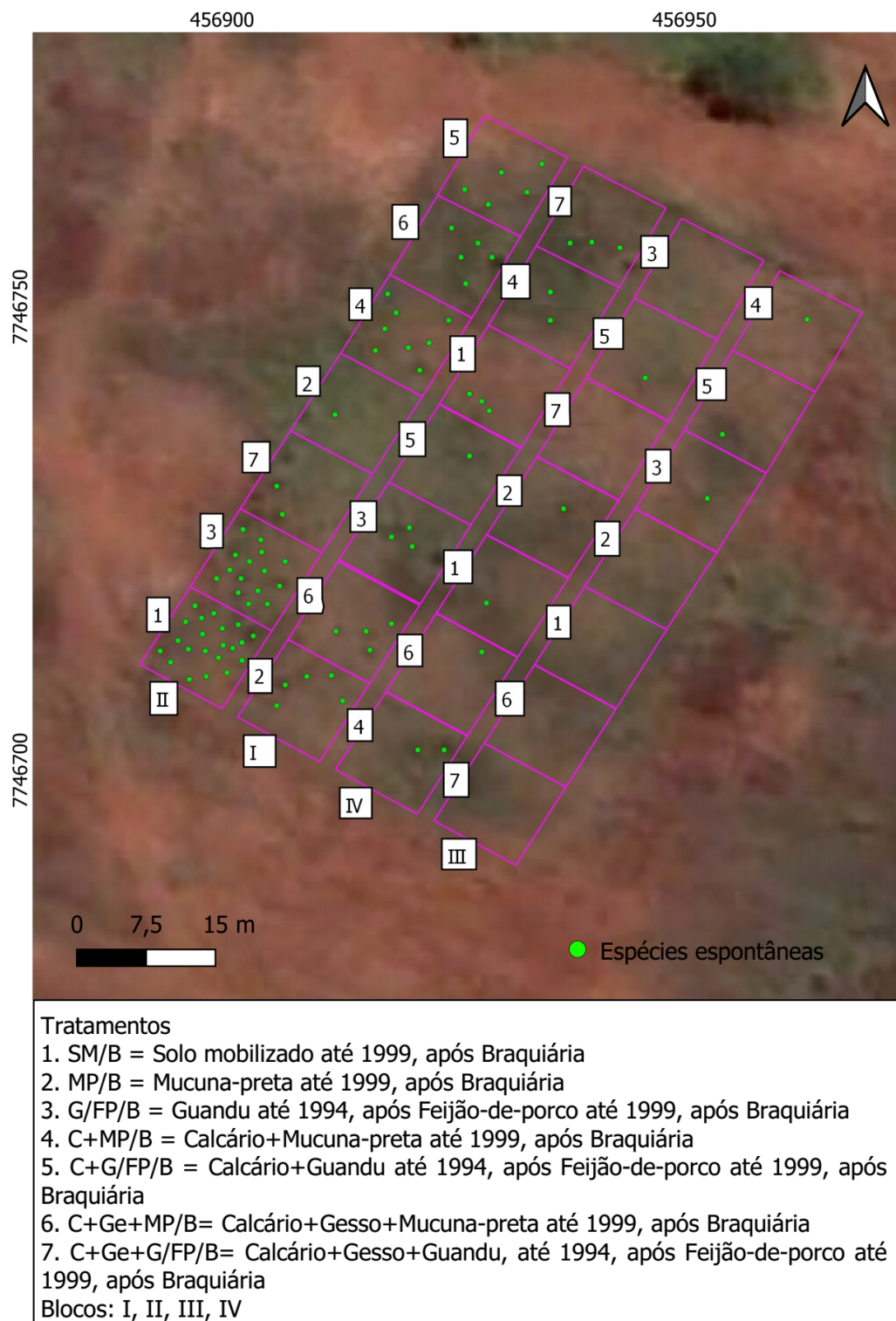
Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 3.3 - Espécies arbóreas presentes na área e nível de sucessão vegetal.

NOME POPULAR	FAMÍLIA	ESTÁGIO SUCESSIONAL
Araticum-rasteiro	Annonaceae	Não pioneira
Bacupari-rasteiro	Clusiaceae	Pioneira
Barbatimão	Fabaceae	Não pioneira
Cabelo-de-nego	Erythroxylaceae	Não pioneira
Camboatá	Sapindaceae	Pioneira
Caqui-do-cerrado	Ebenaceae	Não pioneira
Copaíba	Caesalpinioideae	Não pioneira
Gonçalo-alves	Anacardiaceae	Não pioneira
Guaçatonga	Flacourtiaceae	Pioneira
Jacarandá-do-campo	Fabaceae	Não pioneira
Jacarandá-caroba	Bignoniaceae	Pioneira
Lixeira	Dilleniaceae	Pioneira
Marmelo	Rosaceae	Não pioneira
Marmelo-de-cachorro	Rubiaceae	Não pioneira
Moricisão	Malpighiaceae	Não pioneira
Murici	Malpighiaceae	Não pioneira
Papagaeiro	Celastraceae	Pioneira
Pequizeiro	Caryocaraceae	Não pioneira
Pimenta-de-macaco	Annonaceae	Não pioneira
Roseira-do-campo	Verbenaceae	Não pioneira
Sansão-do-campo	Mimosoideae	Pioneira
Vinhático/Amarelinho	Fabaceae	Não pioneira

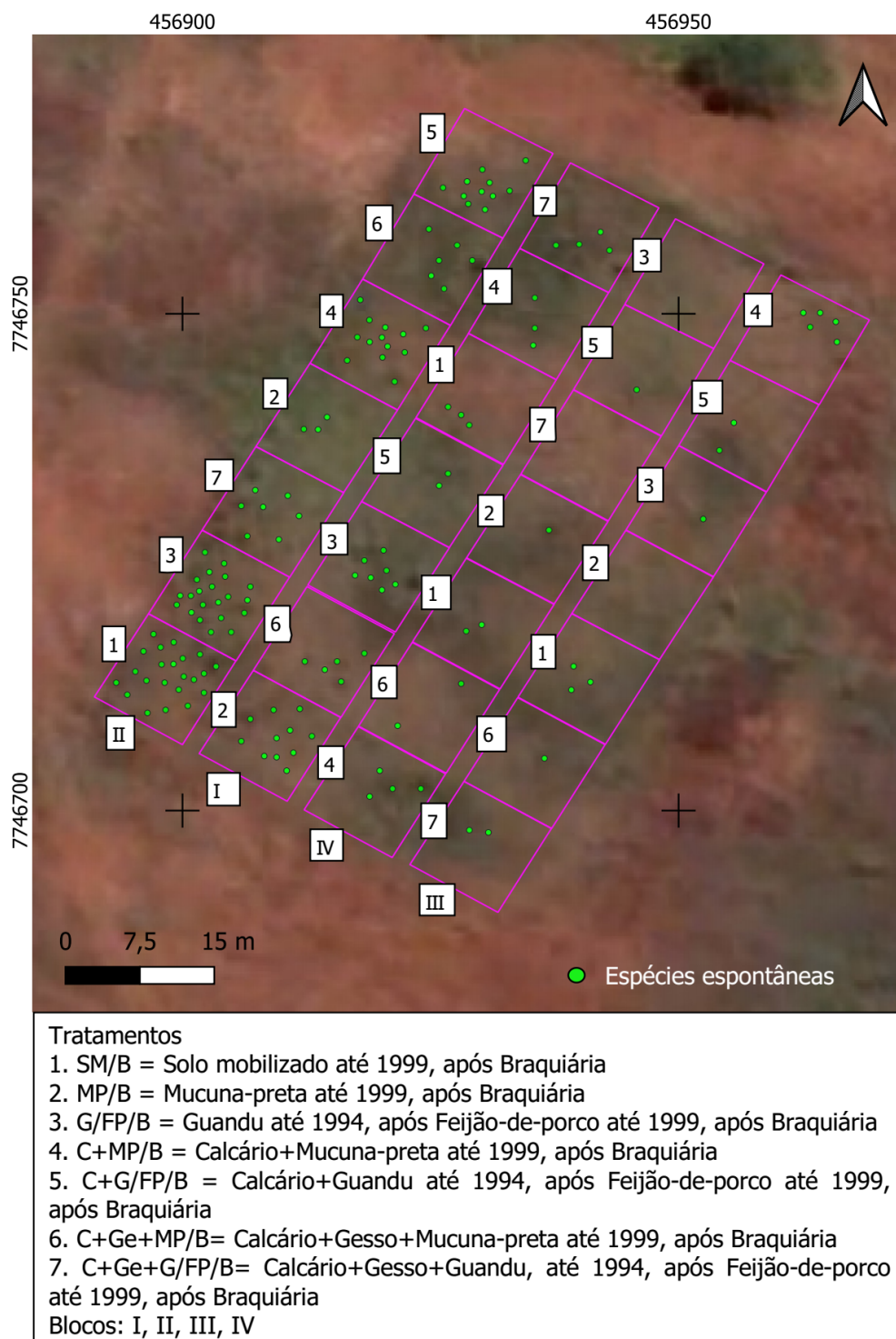
Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.7 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2007, com imagem do Google Earth importada no QGis.



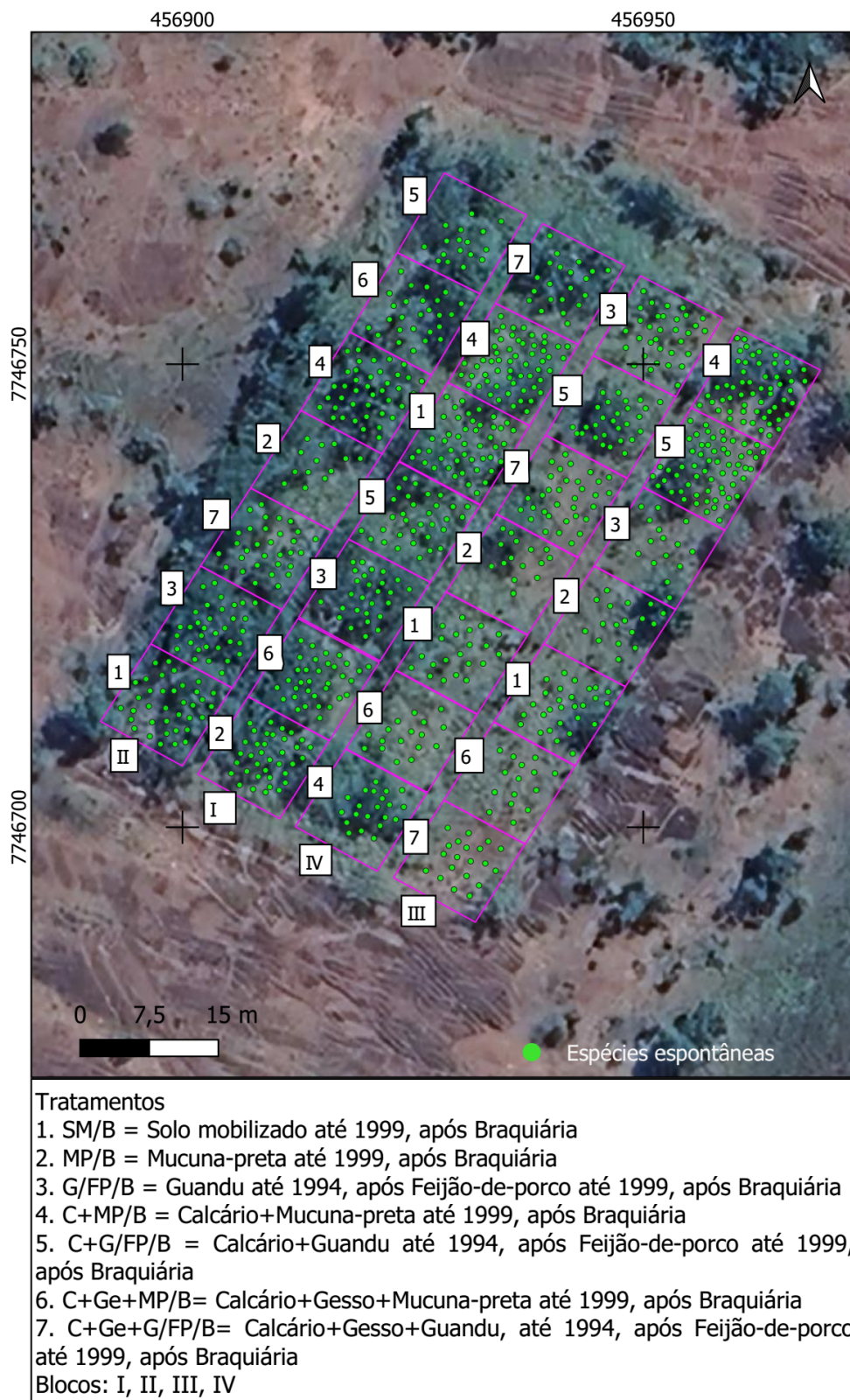
Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.8 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2013, com imagem do Google Earth importada no QGis.



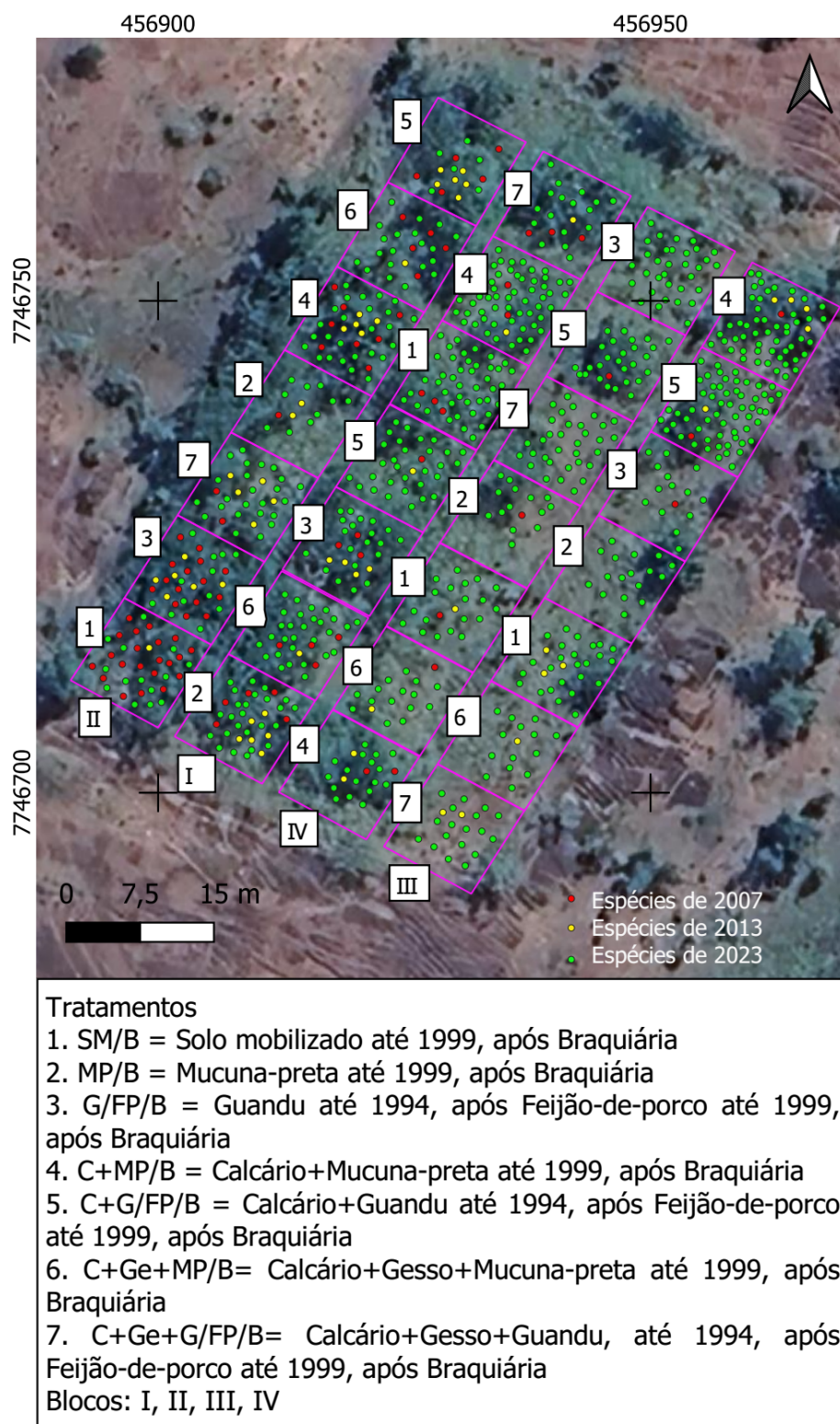
Fonte: Adaptado de Rosa (2014).

Figura 3.9 - Croqui da área experimental com número de árvores em cada parcela, dentro dos blocos I, II, III e IV no ano de 2023, com imagem do Google Earth importada no QGis.



Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.10 - Evolução das espécies nativas do cerrado no período de 2007 a 2023, com imagem do Google Earth importada no QGis.



Fonte: Próprio autor (2023).

As espécies maiores, em que foi possível mensurar a altura e diâmetro, se apresentaram em maior número no bloco III, tendo o Jacarandá do campo como espécie predominante, seguido pela espécie roseira.

Na área experimental 90 plantas apresentaram condições para realização das medições de altura e diâmetro, sendo representadas em sua maioria pelo Jacarandá-do-campo, depois pela Roseira-do-campo, Lixeira e Murici (Tabela 3.4). A maioria dessas espécies surgiram nos blocos III e IV, e pertencem as famílias Fabaceae, Dilleniaceae, Verbenaceae e Malpighiaceae.

De fato, os resultados mostram uma abundância em apenas quatro espécies, enquanto que 6,04% (50 plantas) das espécies amostradas foram escassas com apenas um indivíduo amostrado em sua maioria, com exceção do Araticum-rasteiro e do Jacarandá-caroba. E segundo Londe, Ferreira, Martins (2022), a abundância e distribuição limitada são características que classificam as espécies como raras localmente, no entanto, essas são vitais para a multifuncionalidade e prestação de serviços do ecossistema.

Dessa maneira, a área em recuperação possui o total de 828 plantas, sendo 738 de baixa altura e 90 com altura para a medição dos parâmetros. O inventário florístico apresenta 711 plantas pioneiras e 117 não pioneiras, e apontou 22 espécies, distribuídas em 18 famílias. As famílias mais ricas em espécies foram Fabaceae (668) representando 80,68%, Malpighiaceae com 6,16% (51), Verbenaceae com 3,74% (31) e Dilleniaceae com 3,38% (28). De acordo com Viveiros *et al.* (2021), essa distribuição das espécies em cada sistema indica um gradiente sucessional (Figura 3.11).

Apesar da literatura indicar o estágio sucessional de *Machaerium acutifolium* Vogel como secundária inicial, no presente estudo essa espécie foi categorizada como pioneira, visto se mostrar tolerante a luminosidade em todo o seu ciclo de vida, além de assumir comportamento de espécie colonizadora. As outras espécies se mantiveram na sua classe, conforme recomenda a literatura.

Segundo Costa, Bertolino e Barros (2021), a ocorrência de cinco espécies secundárias tardias demonstra o avanço sucessional no sistema. A presença de secundárias iniciais e pioneiras já bem desenvolvidas, com as maiores alturas e diâmetros, oferece o sombreamento necessário para o desenvolvimento de espécies intolerantes à luminosidade.

A taxa de desenvolvimento das plantas no período de outubro/2007 até outubro/2013 e março/2023 de *Machaerium acutifolium* Vogel (Jacarandá-do-campo), que é a espécie presente em maior número na área, nota-se que no tratamento com mucuna-preta em março/2023 obteve a maior taxa de crescimento (altura e diâmetro). Porém, em outubro/2013 foi o tratamento com calcário+gesso+guandu em que a espécie obteve a maior taxa de crescimento para o diâmetro das plantas, enquanto que para a altura se manteve o tratamento com mucuna-preta. Dessa maneira, é possível perceber que os efeitos dos tratamentos utilizados não estão sendo mais observados ao longo do tempo, mas a reabilitação natural está ocorrendo em toda área experimental, o que significa que há condições físico-químicas do solo para o desenvolvimento das árvores, tanto em altura como em diâmetro (Figura 3.12 e Figura 3.13).

As classes de DAP foram divididas em cinco categorias, que foram de 1,0 a 20,9 cm, 21,0 a 40,9 cm, 41,0 a 60,9 cm, 61,0 a 80,9 cm e 81,0 a 100,9 cm. Em 2023, a área em recuperação mostrou que 62,2% das árvores estavam na classe de 21,0 a 40,9 cm de diâmetro. Segundo Nurfaeiza *et al.*, (2022), a estrutura do povoamento mostrou que além das plantas jovens e recém-regeneradas, existe plantas em idade adulta, uma vez que houve registro de árvores com DAP superior a 31 cm.

Em todos os tratamentos de recuperação do solo houve acréscimo no diâmetro a 0,10 m do solo, entretanto houve também uma diminuição significativa no número de indivíduos de *Machaerium acutifolium* Vogel o que resultou numa queda nas médias das alturas das plantas. No entanto, o número de outras espécies (Lixeira, Roseira, Vinhático) aumentou na área experimental (Tabela 3.2), sendo dezenove plantas com porte para medição de altura e diâmetro (Tabela 3.4). Dessa maneira, observa-se que o *Machaerium acutifolium* Vogel não é competitivo, já que foram encontradas outras plantas aos arredores da planta matriz, podendo-se afirmar que a mesma oferece condições para o desenvolvimento de outras espécies. Todavia, não foi encontrada nenhuma planta da mesma espécie (*M. acutifolium*) próximo da planta matriz, evidenciando que a área experimental, criou condições benéficas para o estabelecimento desta espécie.

De acordo com Rosa (2014), às gramíneas quase sempre estão inclusas no processo de recuperação de solos degradados, pois são capazes de acrescentar grande parte de matéria orgânica ao solo, desenvolvem-se rapidamente e possuem

um sistema radicular fasciculado com grande volume de raízes que se renova constantemente.

Tabela 3.4 - Levantamento florístico das espécies arbóreas com altura de medição presentes na área.

Bloco	Espécie	Família	Altura (m)	DAS (cm)	DAP (cm)
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,3	10,89	34,2
I	Lixeira	Dilleniaceae	6,0	7,00	22
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,1	20,02	62,9
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,3	6,68	21
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,0	7,38	23,2
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,0	8,28	26
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,4	15,92	50
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,7	7,32	23
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,0	14,64	46
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,9	17,19	54
I	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	2,7	14,32	45
II	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,6	14,64	46
II	Lixeira	Dilleniaceae	7,3	8,53	26,8
II	Vinhático	Fabaceae	6,0	12,56	39,45
II	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,4	20,09	63,1
II	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,9	9,23	29
II	Lixeira	Dilleniaceae	3,4	7,96	25
II	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,5	10,25	32,2
III	Lixeira	Dilleniaceae	6,3	12,26	38,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,4	16,23	51
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,5	12,26	38,5
III	Lixeira	Dilleniaceae	6,0	12,97	40,75
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	9,7	13,37	42
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,2	17,51	55
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,4	11,84	37,2
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	9,3	17,19	54
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,0	10,66	33,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,8	20,79	65,3
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,4	9,71	30,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,3	9,87	31
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,1	7,70	24,2
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,0	11,46	36
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,2	8,34	26,2
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,6	10,19	32
III	Roseira	Verbenaceae	8,0	16,08	50,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,6	8,28	26
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,7	9,07	28,5

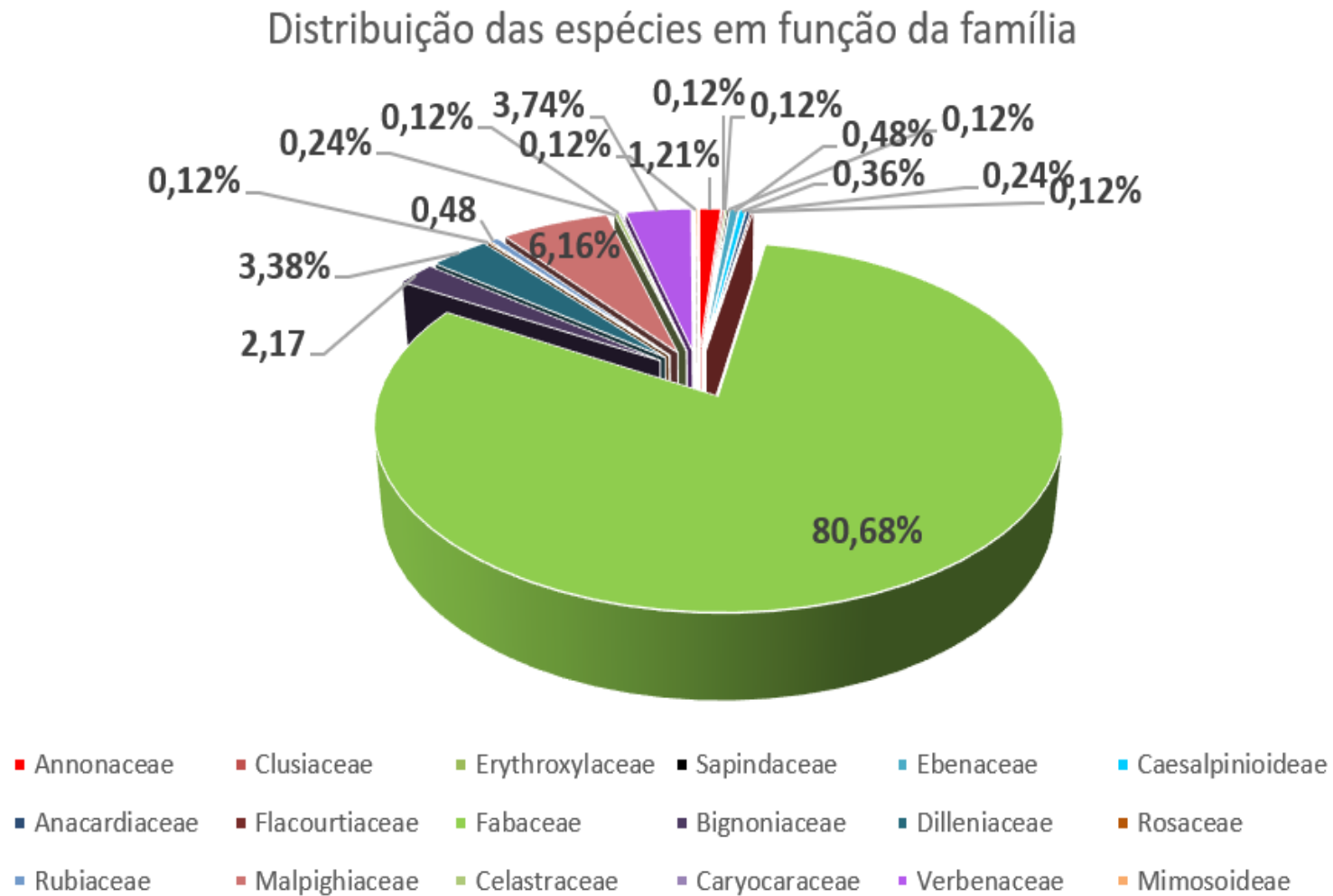
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,5	6,37	20
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,7	6,81	21,4
III	Roseira	Verbenaceae	5,2	13,05	41
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	9,5	12,73	40
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,1	7,48	23,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,4	9,80	30,8
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	3,3	6,43	20,2
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,6	21,01	66
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	2,6	6,84	21,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,8	9,87	31
III	Roseira	Verbenaceae	3,4	9,55	30
III	Roseira	Verbenaceae	4,9	9,71	30,5
III	Roseira	Verbenaceae	5,5	6,37	20
III	Roseira	Verbenaceae	4,0	8,28	26
III	Roseira	Verbenaceae	6,6	6,37	20
III	Roseira	Verbenaceae	8,5	6,21	19,5
III	Roseira	Verbenaceae	2,9	10,03	31,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,3	8,28	26
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,5	11,14	35
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,9	14,64	46
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,0	12,89	40,5
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,9	16,17	50,8
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,0	7,83	24,6
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,9	15,79	49,6
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	3,5	7,32	23
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,7	13,05	41
III	Lixeira	Dilleniaceae	4,1	9,87	31
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,3	13,37	42
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,6	12,16	38,2
III	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,5	6,18	19,4
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,3	10,19	32
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	4,9	14,67	46,1
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,8	12,35	38,8
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,3	18,21	57,2
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,7	12,73	40
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,3	8,02	25,2
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,4	11,81	37,1
IV	Roseira	Verbenaceae	4,5	8,94	28,1
IV	Roseira	Verbenaceae	5,5	10,12	31,8
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,5	12,86	40,4
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,8	15,66	49,2
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,0	18,65	58,6

IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	9,9	26,10	82
IV	Roseira	Verbenaceae	4,9	10,35	32,5
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,5	7,96	25
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,7	7,00	22
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	7,0	15,85	49,8
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,3	7,64	24
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	5,0	8,24	25,9
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,1	12,80	40,2
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	6,1	18,21	57,2
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	10,6	30,59	96,1
IV	Jacarandá-do-campo	Fabaceae	8,9	8,57	26,933

DAS:diâmetro à altura do solo; DAP: diâmetro à altura do peito.

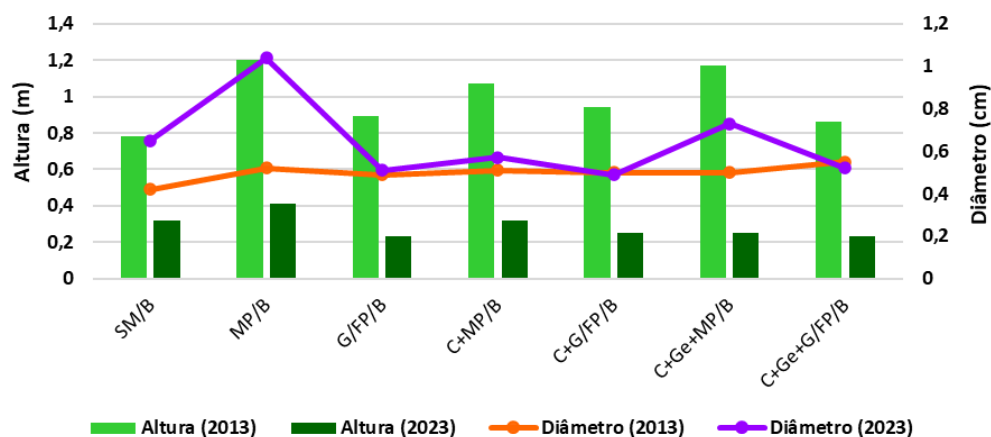
Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.11 - Todas as espécies arbóreas encontradas na área distribuídas por família.



Fonte: Próprio autor (2023).

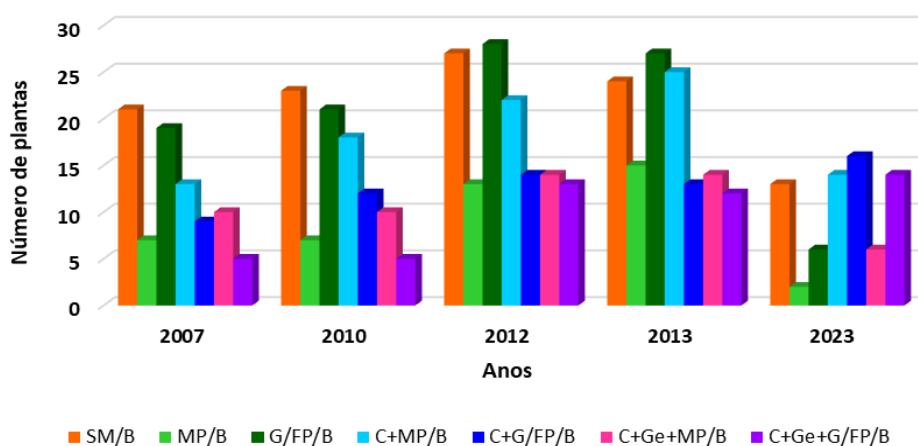
Figura 3.12 - Taxa de crescimento de plantas da espécie *Machaerium acutifolium* Vogel (Jacarandá do Campo) de Outubro/2007 a Outubro/2013 e Março/2023, e número de indivíduos total e por tratamento. Selvíria, MS.



TC* - Taxa de Crescimento. Sendo número de dias entre a primeira e a última avaliação: - (outubro/2007 a outubro/2011 = 1459 dias acumulados); e - (outubro/2007 a outubro/2013 = 2190 dias acumulados); e - (outubro/2007 a março/2023 = 5628 dias acumulados). SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U = Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U = Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor (2023).

Figura 3.13 - Número de plantas da espécie *Machaerium acutifolium* Vogel (Jacarandá do Campo).



Fonte: Próprio autor (2023).

3.4 Conclusão

Os tratamentos de recuperação do solo têm sido bons indicadores de regeneração, apresentaram a ocorrência de dezesseis novas espécies nativas do cerrado, sendo que a espécie *Machaerium acutifolium* Vogel foi a mais adaptada.

Dos tratamentos aplicados na área em recuperação, o desenvolvimento das espécies foi maior nas parcelas que receberam tratamento com calcário+mucuna-preta e calcário+guandu nos blocos I e III, respectivamente.

A taxa de crescimento da *M. acutifolium* foi maior no tratamento com mucuna-preta, sendo que os efeitos dos tratamentos utilizados não estão sendo mais observados ao longo do tempo, mas a reabilitação natural está ocorrendo em toda área experimental.

REFERÊNCIAS

ADEDEJI, P. A.; AKINLABI, E.; MADUSHELE, N.; OLATUNJI, O. O. Towards low-carbon energy state in South Africa: a survey of energy availability and Sustainability. **EAI Endorsed Transactions on Energy Web**, v. 7, n. 26, p. 1-15, 2020.

ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V.; SOUZA, Z. M. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 887-893, 2012.

ALVES, M. C. **Recuperação do subsolo de um Latossolo Vermelho usado para terrapleno e fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira - SP**. 2001. 83 f. Tese (Livre Docência em Solos) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.

BEDNÁŘ, M.; ŠARAPATKA, B. Relationships between physical–geographical factors and soil degradation on agricultural land. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 164, n. 1, p. 660-668, 2018.

BERTÃO, E. F.; RICARDI, A. M.; LIMA, C. G. R. Análise Multitemporal do Uso e Cobertura da Terra e Potencial de Degradação do Solo na Microbacia do Córrego Laranja Azeda -Município de Pereira Barreto, SP. **ANAP**, Tupã, v. 12, n. 27, p. 54-71, 2019.

BOHM, P. A. F.; SILVA, J. J. S.; LEITE, H. S.; ROCATELLI, D. C.; CORBETTA, C. M.; ZANARDO, F. Efeitos da presença de palhada de capim braquiária no crescimento inicial de *Cichorium intybus*. **RAEI**, Paranaguá, v. 3, n. 3, p. 19-25, 2021.

BONINI, C. S. B. **Propriedades físico-químicas de um Latossolo Vermelho sob recuperação há 16 anos e a ocorrência espontânea de espécies arbóreas nativas**. 2010. 106 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação das propriedades químicas de um solo degradado. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 388 – 93, 2015. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393

CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **PUBVET**, Londrina, v. 11, n. 10, p. 1036-1045, 2017.

COSTA, K. K. S.; BERTOLINO, A. V. F. A.; BARROS, A. A. M. Regeneração da cobertura vegetal em área de agricultura de corte e queima em São Pedro da Serra, Nova Friburgo (Rio de Janeiro, Brasil). **Rev. Tamoios**, São Gonçalo, v. 17, n. 2, p. 84-110, 2021.

CRUZ, A. R.; TEIXEIRA, C. S.; PEREIRA, J. A.; AMORIM, R.; PINHEIRO, J. R. Impacto causado pela implantação de usina hidrelétrica e PCH's na Amazônia Meridional. **Revista Eletrônica Geoaraguaia**, Barra do Garças, v. 6, n. 1, p. 19-29, 2016.

DAMENE, S.; BAHIR, A.; VILLAMOR, G. B. The role of Chomo grass (*Brachiaria humidicola*) and exclosures in restoring soil organic matter, total nitrogen, and associated functions in degraded lands in Ethiopia. **Regional Environmental Change**, v. 20, n. 92, p. 1-13, 2020.

DURIGAN, G.; MELO, A. C. G.; MAX, J. C. M.; VILAS BOAS, O.; CONTIERI, W. A.; RAMOS, V. S. **Manual para recuperação da vegetação de cerrado**. 3.ed. São Paulo: SMA, 19 p. 2011.

EDRISI, S. A.; EL-KEBLAWY, A.; ABHILASH, P. C. Sustainability Analysis of *Prosopis juliflora* (Sw.) DC Based Restoration of Degraded Land in North India. **Land**, Canadá, v. 9, n. 59, p. 1-18, 2020.

FONSECA, W. S.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M. Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2023.

FRIESEM, D. E.; ABADI, I.; SHAHAM, D.; GROSMAN, L. Lime plaster cover of the dead 12,000 years ago – new evidence for the origins of lime plaster technology. **Evolutionary Human Sciences**, v. 1, n. 9, p. 1-23, 2019.

GASTAUER, M.; SOUZA FILHO, P. W. M.; RAMOS, S. J.; CALDEIRA, C. F.; SILVA, J. R.; SIQUEIRA, J. O.; FURTINI NETO, A. E. Mine land rehabilitation in Brazil: Goals and techniques in the context of legal requirements. **Ambio**, v. 48, p. 74–88, 2019.

HABERMANN, E.; DE OLIVEIRA, E.A.D.; BARRETO, R.F. Low soil nutrient availability does not decrease post-drought recovery of *Brachiaria Mavuno*. **Brazilian Journal of Botany**, v. 44, p. 849–858, 2021.

KITAMURA, A. E.; TAVARES, R. L. M.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery of degraded Cerrado soil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 50, n. 8, p. 1-8, 2020.

KUPREEV, V. E.; SEMENISHCHENKOV, Y. A.; TELEGANOVA, V. V.; MUCHNIK, E. E. Ecological and Floristic Features of Pioneer Grass Vegetation on Automorphic Sandy Soils as a Pine-Forest Recovery Phase in the Southern Part of the Nonchernozem Zone of Russia. **Contemporary Problems of Ecology**, v. 13, n. 1, p. 20–35, 2020.

LANCASTER, L. C. Mortars and plasters—How mortars were made. The literary sources. **Archaeological and Anthropological Sciences**, v. 13, n. 192, p. 1-20, 2021.

LONDE, V.; FERREIRA, F. S.; MARTINS, F. R. Structure of a Semideciduous Seasonal Forest in the National Forest of Ipanema, Brazil: Contributing to the Floristic Knowledge of a Poorly Studied Protected Area. **Research in Ecology**, v. 4, n. 3, p. 10-19, 2022.

LORENZI, H.; SOUZA, V. C. **Chave de identificação: para as principais famílias de angiospermas nativas e cultivadas do Brasil**. Nova Odessa: Editora Plantarum, São Paulo, 2007.

MAITRA, S.; ZAMAN, A.; MANDAL, T. K.; PALAI, J. B. Green manures in agriculture: A review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, New Delhi, v. 7, n. 5, p. 1319-1327, 2018.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Planaltina: EMBRAPA, 2018, 24 p.

NURFAEIZA, A. R. S.; SHAMSUL, K.; WAN JULIANA, W. A.; SHUKOR, M. N. Tropical rainforest regeneration in an area devastated by dam impoundment in hulu terengganu, Malaysia. **The Malaysian Forester**, v. 85, n. 1, p. 96–108, 2022.

OLIVEIRA, N. C. C. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia Historia**, Belo Horizonte, v. 34, n. 65, p. 315-346, 2018.

PAGOTO, J. M.; MASSI, K. G.; COLLARD, F. H. Green manure cover effects on restoration success in Southeast Atlantic Forest biome. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 50, n. 3844, p. 1-10, 2022.

ROSA, P. A. L.; ALVES, M. C.; VIDEIRA, L. M. L. BONINI, C. B. S. Recuperação de um solo de cerrado após 19 anos: ocorrência espontânea de espécies arbóreas. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 1, n. 1, p. 44-57, 2014.

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Brazilian system of soil classification** (Sistema brasileiro de classificação de solos). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; MACHADO, E.; PANIAGUA, L. L.; CARREIRA, E.; MORAL, F.; PEREIRA, A.; CARVALHO, M. Floristic Composition: Dynamic Biodiversity Indicator of Tree Canopy Effect on Dryland and Improved Mediterranean Pastures. **Agriculture**, Canadá, v. 11, n. 1128, p. 1-25, 2021.

SILVA, R. F.; SILVA, I. F.; DIAS, B. O.; SILVA, R. F.; CARNEIRO, K. A. A.; REGO, E. R. Nitrogen fertilization in *Brachiaria decumbens* Stapf grass under degraded soil condition. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 10, p. 1-17, 2020.

SOIL SURVEY STAFF - KEYS TO SOIL TAXONOMY (12th edition), U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. (2014)

SOUTO FILHO, S. N.; ALVES, M. C.; MONREAL, C. M.; BONINI, C. S. B. Nanoparticles and nanostructure morphology of a Red Latosol in rehabilitation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Impresso), Campina Grande, v. 21, p. 530-536, 2017.

UNESP. Universidade Estadual Paulista. Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira - Área de Hidráulica e Irrigação. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

VIEIRA, K. I. C.; LUZ, C. F. P.; MOREIRA, N. C.; BANDEIRA, O. H. S.; RESENDE, H. C. Levantamento florístico e estudo palinológico de áreas sob influência do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG, Brasil, visando o desenvolvimento da Meliponicultura como estratégia para a recuperação ambiental. **Hoehnea**, São Paulo, v. 47, p. 1-51, 2020.

VIVEIROS, E.; FRANCISCO, B. S.; LÓPEZ, A. M. T.; PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; SILVA, J. M. S. Drivers of Restoration Trajectory of a Community of Regenerant Plants: Natural Regeneration or Tree Seedling? **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 28, n. 3, p. 1-13, 2021.

YIRDAW, E.; MONGE, A. M.; AUSTIN, D.; TOURE, I. Recovery of floristic diversity, composition and structure of regrowth forests on fallow lands: implications for conservation and restoration of degraded forest lands in Laos. **New Forests**, v. 50, p. 1007–1026, 2019.

CAPÍTULO 4 - MONITORAMENTO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM ÁREA DE RECUPERAÇÃO POR 30 ANOS UTILIZANDO ESPÉCIES DE COBERTURA DO SOLO INTRODUZIDAS E ESPONTÂNEAS, CALCÁRIO E GESSO

RESUMO

O uso excessivo do solo tem causado sua degradação e diminuição de produtividade, para reabilitar essas áreas, é necessário investigar e aplicar técnicas de recuperação com indicadores qualitativos e quantitativos. No entanto, a principal dificuldade é estabelecer um horizonte A adequado para dar suporte a outros horizontes. O objetivo deste estudo foi avaliar a evolução da porosidade e densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico que está em processo de recuperação há 30 anos, com a utilização de calagem, gesso e espécies de cobertura do solo introduzidas e espontâneas (*Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy, *Cajanus cajan* (L.) Millsp, *Canavalia ensiformis*, *Urochloa decumbens*). O experimento foi realizado em blocos casualizados, com sete tratamentos e quatro repetições. Os atributos físicos do solo (densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade) foram analisados nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m nos anos de 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 2008, 2009, 2010, 2011, 2022 e 2023, utilizando o programa SISVAR, com a realização da ANOVA e teste de Scott-Knott (5%). As técnicas utilizadas incluíram a mobilização do solo (vegetação espontânea), a utilização de *Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy, *Cajanus cajan* (L.) Millsp, *Canavalia ensiformis* e as combinações cultura de cobertura+calcário e cultura de cobertura/calcário+gesso. Com os resultados obtidos foi possível concluir que o tempo influenciou na macroporosidade na primeira camada de solo, sobre a ação das raízes da *Urochloa decumbens*, e apresentou valores melhores na camada de 0,20-0,40m para a porosidade total somente no ano de 2023. Conclui-se que os tratamentos até 1998 e após 2008 refletem principalmente no aumento/diminuição da macroporosidade/densidade na camada superficial.

Palavras-chave: solo em recuperação; qualidade de solo; adubação verde; *Urochloa decumbens*; matéria orgânica; solo decapitado.

ABSTRACT

Excessive use of soil has caused its degradation and reduced productivity, to rehabilitate these areas, it is necessary to investigate and apply recovery techniques with qualitative and quantitative indicators. However, the main difficulty is to establish an adequate A horizon to support other horizons. The objective of this study was to evaluate the evolution of soil porosity and density of a dystrophic Red Oxisol that has been in the recovery process for 30 years, with the use of liming, gypsum and introduced and spontaneous soil cover species (*Stizolobium aterrimum* Piper and Tracy, *Cajanus cajan* (L.) Millsp, *Canavalia ensiformis*, *Urochloa decumbens*). The experiment was carried out in randomized blocks, with seven treatments and four replications. The physical attributes of the soil (soil density, total porosity, macroporosity and microporosity) were analyzed in layers 0-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.40m in the years 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 2008, 2009, 2010, 2011, 2022 and 2023, using the SISVAR program, with ANOVA and Scott-Knott test (5%). The techniques used included soil mobilization (spontaneous vegetation), the use of *Stizolobium aterrimum* Piper and Tracy, *Cajanus cajan* (L.) Millsp, *Canavalia ensiformis* and the combinations of cover crop+limestone and cover crop/limestone+gypsum. With the results obtained, it was possible to conclude that time influenced the macroporosity in the first layer of soil, on the action of the *Urochloa decumbens* roots, and presented better values in the 0.20-0.40m layer for total porosity only in the year 2023. It is concluded that treatments until 1998 and after 2008 mainly reflect an increase/decrease in macroporosity/density in the surface layer.

Keywords: recovery soil; soil quality; cover crop; brachiaria; organic matter; soil degradation.

4.1 Introdução

Com o uso inadequado do solo, cerca de 33% desse recurso natural apresenta-se em estado de moderada a alta degradação. Isso resulta principalmente na perda de matéria orgânica do solo, compactação e desequilíbrio dos nutrientes presentes (MENDES *et al.*, 2018). No entanto, há esperança para a recuperação dos

solos degradados. De acordo com Chitero *et al.* (2020), novas técnicas têm sido aplicadas para recuperar os atributos físicos do solo.

O planejamento para a recuperação de áreas degradadas enfrenta um grande desafio: estabelecer um horizonte A que possa fornecer suporte para o desenvolvimento de outros horizontes (BISI *et al.*, 2019). Nesse sentido, certos atributos do solo são utilizadas como indicadores de sua qualidade, como é o caso da compactação, que afeta negativamente a permeabilidade, a capacidade de retenção de água, o crescimento das raízes e a atividade biológica do solo (FONSECA; MARTINS; VILLA, 2023).

Os indicadores de qualidade do solo têm uma variedade de aplicações importantes, incluindo a avaliação do funcionamento do ecossistema, a identificação e caracterização dos processos de degradação, bem como a análise da eficácia das estratégias de restauração e adequação do solo. Para cumprir essas funções, os indicadores devem levar em consideração os atributos e processos do solo, estabelecer correlações positivas com os processos do ecossistema e serem sensíveis ao manejo quanto ao clima (BISI *et al.*, 2019). Neste sentido, é recomendada a avaliação de atributos físicos como estabilidade de macroagregados, condutividade elétrica, capacidade de retenção de água, porosidade, densidade aparente e taxa de infiltração (SANTOS *et al.*, 2021).

Uma compreensão aprofundada das limitações específicas da porosidade do solo pode ser de grande ajuda para o manejo adequado, uma vez que ela é influenciada por diversas diferenças de tamanho entre as partículas. Por exemplo, os solos argilosos possuem uma maior quantidade de microporos e uma área superficial maior, enquanto os solos arenosos apresentam uma grande quantidade de macroporos, o que garante uma excelente aeração e permeabilidade. Portanto, entender essas diferenças pode ser essencial para escolher as práticas adequadas de manejo do solo, de modo a garantir um ambiente favorável ao crescimento das plantas e outras formas de vida (FINKLER *et al.*, 2018; JIM; NG, 2018).

De acordo com Pelinson *et al.* (2021), diversos fatores influenciam a densidade do solo, principalmente a quantidade dos espaços porosos presentes. Quanto maior a quantidade desses espaços, menor será a suscetibilidade do solo à compactação. Além disso, a densidade do solo pode variar em função da profundidade, aumentando nos perfis mais profundos devido à menor concentração de matéria orgânica, fatores biológicos e maior compactação.

No entanto, é possível reduzir o valor da densidade do solo por meio da aplicação de matéria orgânica, em suas diferentes formas, como a adubação verde. Essa prática melhora a qualidade do solo, aumenta a quantidade de nutrientes e água disponíveis para as plantas, e reduz a compactação do solo. Dessa forma, a adubação verde é uma estratégia eficiente para promover a saúde do solo e a produção agrícola sustentável (FAUSTINO; MARCIANO, 2021).

A avaliação da resistência mecânica do solo à penetração e da capacidade de infiltração de água é essencial para identificar a sua capacidade de uso, considerando a resistência, a capacidade de desenvolvimento das raízes, o armazenamento de água, a plasticidade e a capacidade de retenção de nutrientes (MÜLLER *et al.*, 2021). Locais com maior mobilidade do solo, geralmente associados ao uso de ferramentas, apresentam maiores valores de resistência do solo à penetração, indicando a presença de camadas compactadas (POLANÍA-HINCAPIÉ *et al.*, 2021).

A compactação ou a dureza do solo está diretamente relacionada com a umidade, que é a relação entre o teor de água presente no solo e o peso dos seus sólidos. Portanto, é possível que a compactação do solo seja mascarada por uma alta umidade durante a coleta da amostra (FAUSTINO; MARCIANO, 2021).

A estabilidade do agregado é um fator crucial que influencia a função do solo, e é considerado um indicador importante da qualidade do solo e sua suscetibilidade à erosão. Os agregados do solo são formados por meio da aproximação das partículas, o que pode ser estimulado pelo crescimento das raízes, movimento da fauna, expansão durante o umedecimento do solo, contração durante a secagem, floculação e estabilização gerada pelos agentes cimentante (XINLIANG *et al.*, 2021, SILVA, 2020). A presença de agregados estáveis aumenta a capacidade de armazenamento de água no solo, contribui para a proteção física do solo, reduz a perda de partículas e nutrientes causada pela erosão, além de favorecer o acúmulo de matéria orgânica (USHARANI; ROOPASHREE; DHANANJAY, 2019; SOUSA *et al.*, 2020; PAN *et al.*, 2018).

A eficiência na recuperação dos solos está diretamente relacionada à identificação e caracterização dos agentes de degradação em ação. Esses agentes são capazes de indicar o estado dos atributos físicos e químicos do solo, o que é crucial para escolher a técnica de recuperação adequada (SOUZA *et al.* (2019).

A restauração de áreas de empréstimo visa reestabelecer as características originais do solo e controlar a ação dos agentes causadores de sua degradação. Para alcançar esse objetivo, é necessário realizar estudos da estrutura das comunidades e avaliar a capacidade de resiliência do ecossistema. Existem métodos diretos, que fazem uso de práticas mecânicas e químicas, e métodos indiretos, que utilizam espécies vegetais para potencializar o processo de recuperação. A escolha do método mais adequado deve ser baseada em uma análise cuidadosa das condições locais (CARVALHO *et al.*, 2017).

Com base nos estudos realizados por Rocha *et al.* (2021) e Faustino e Marciano (2021), a seleção adequada de espécies e a determinação precisa dos seus requerimentos nutricionais são cruciais para se obter resultados satisfatórios no processo de recuperação de solos. As espécies de leguminosas, em particular, são amplamente reconhecidas por seus efeitos benéficos na melhoria da fertilidade do solo. Além disso, a adição de matéria orgânica é um fator essencial que pode aumentar a atividade microbiana do solo e contribuir para a formação e estabilização dos agregados, melhorando, assim, a sua estruturação. Em resumo, a escolha adequada de espécies e a adoção de práticas de manejo que promovam a incorporação de matéria orgânica são estratégias fundamentais para a recuperação de solos degradados.

Para recuperar áreas de empréstimo com baixa capacidade de resiliência, é necessário selecionar e identificar espécies que sejam aptas às novas condições edáficas e capazes de acelerar a formação dos horizontes mais superficiais do solo. No entanto, a adaptação dessas plantas às novas condições depende diretamente das condições físicas, químicas, biológicas e hídricas presentes no solo (KITAMURA *et al.*, 2020; AZERIA *et al.*, 2020).

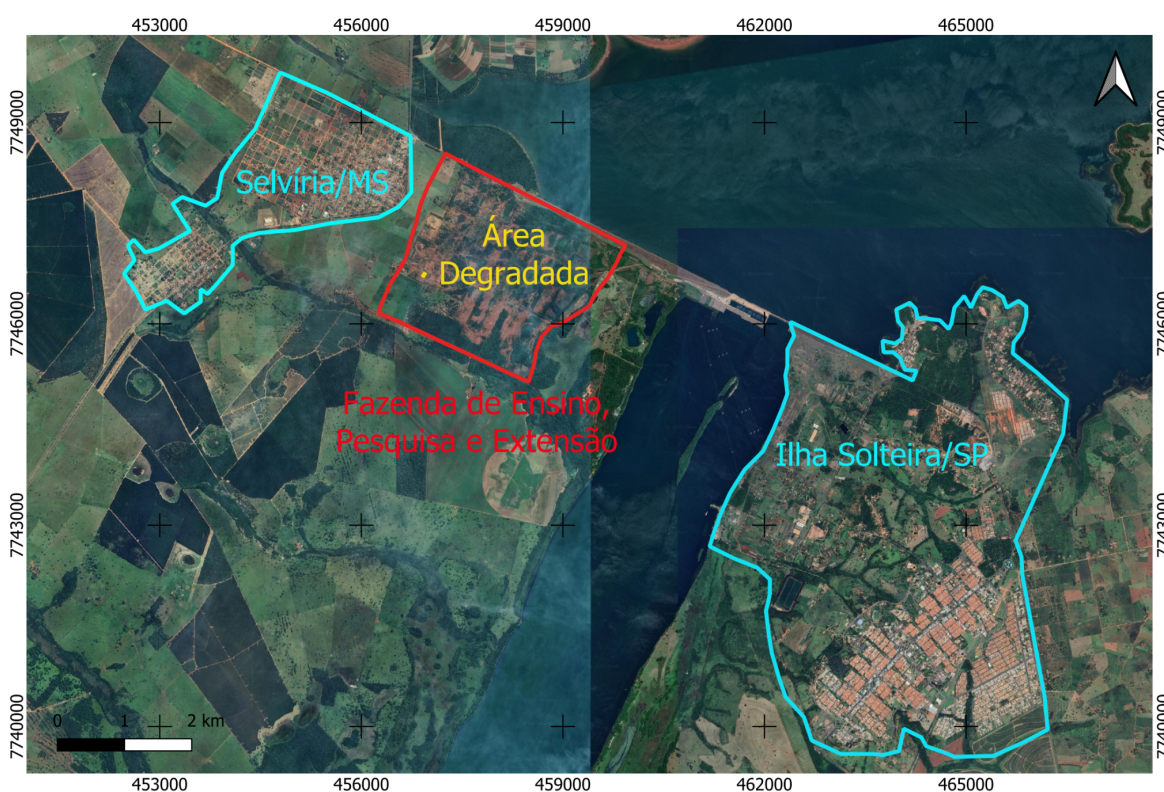
O objetivo deste trabalho foi avaliar a evolução da porosidade e da densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico que tem sido recuperado ao longo de 30 anos, por meio da utilização de combinações de calagem, gessagem e espécies de cobertura do solo introduzidas e espontâneas.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo e delineamento experimental

O experimento foi realizado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp, localizada no município de Selvíria/MS - Brasil (Figura 4.1). A área fica entre as coordenadas 20°22' de latitude Sul e 51°22' de longitude Oeste, com uma altitude média de 327 metros acima do nível do mar.

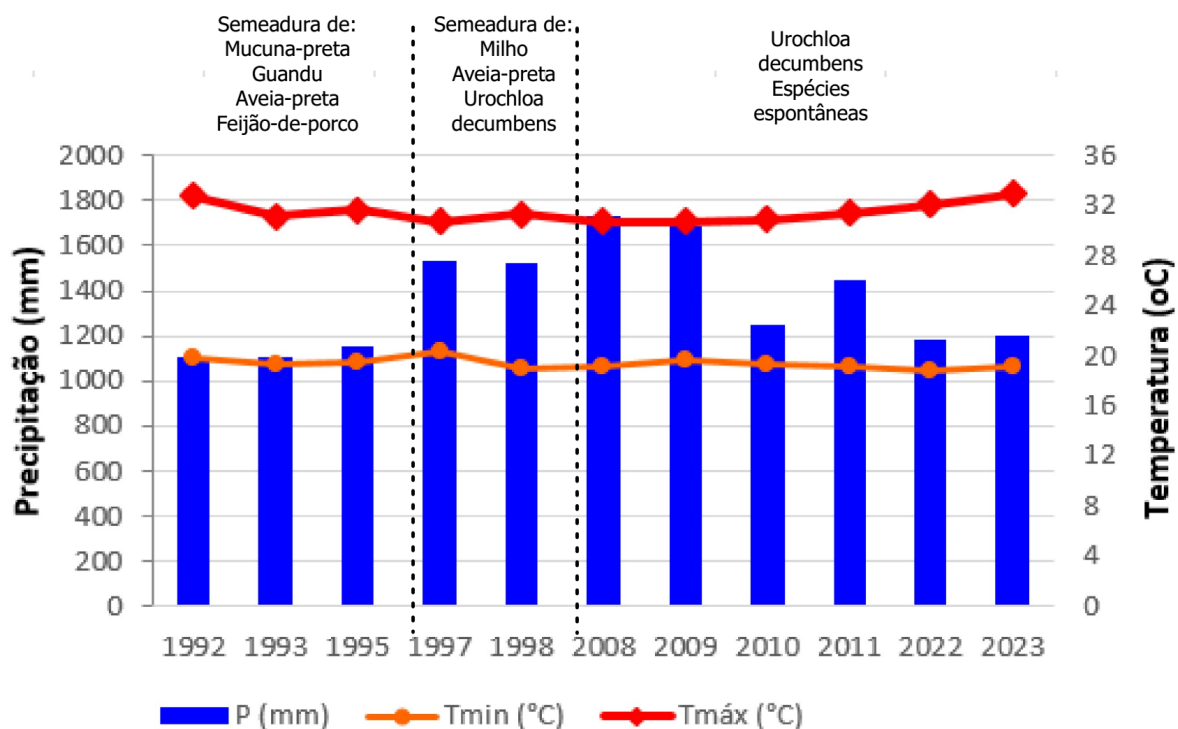
Figura 4.1 - Imagem de satélite indicando a localização da área experimental.
Selvíria – MS, 2023.



Fonte: Próprio autor (2023).

O tipo climático da região é classificado como Aw de acordo com Koppen (1990), com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso. A região apresenta uma precipitação média anual de 1370 mm, temperatura média anual é de 23,5 °C e umidade relativa do ar entre 70-80% (média anual) (Figura 4.2). Os solos na região são predominantemente de textura franco argilo-arenosa e rico em sesquióxidos, classificados como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018) ou Oxisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Figura 4.2 - Precipitação total anual e temperatura média anual do Município de Selvíria-MS.



Fonte: UNESP (2023); Próprio autor (2023).

Na área em estudo foi retirado uma camada de 8,6 metros do perfil do solo original (Figura 4.3), para a terraplanagem e fundação da barragem para construção da usina Hidrelétrica de Ilha Solteira-SP, que teve início na década de 60, sendo que o subsolo estava exposto desde 1969, dando origem a uma área degradada (ALVES; NASCIMENTO; SOUZA, 2012).

No ano de 1992, o subsolo apresentava-se com compactação superficial e baixa presença de vegetação espontânea. Nesse mesmo ano iniciou o trabalho de recuperação, e o preparo do solo foi realizado efetuando-se uma subsolagem que atingiu uma profundidade média de 0,40m na área em estudo.

Durante o período de pesquisa, o solo foi preparado por meio de aração, utilizando um arado de aivecas tracionado por um trator de 110 cv. Posteriormente, uma gradagem niveladora foi realizada com uma grade de arrasto acoplada a um trator de 85cv. Foi realizada a caracterização físico-química da área que está apresentada na Tabela 4.1.

A semeadura das espécies foi conduzida manualmente, enquanto os sulcos foram criados por um conjunto composto por um trator de 75cv e um sulcador. Os

sulcos apresentavam dimensões de aproximadamente 0,50m entre linhas e 0,15m de profundidade.

A densidade de semeadura dos adubos verdes foi estabelecida em 10 plantas por metro linear. A correção do solo foi baseada na caracterização química da área experimental. A aplicação de calcário para atingir uma saturação por bases de 70% foi realizada com 18,5kg de calcário por parcela (parcelas com calcário apenas). Nas parcelas com calcário e gesso, ocorreu a substituição de 20% do CaO do calcário pelo CaO do gesso, aplicando 5,2 kg de gesso e 13,8 kg de calcário por parcela, ambos incorporados no solo. O calcário dolomítico com PRNT de 70% foi utilizado.

Em 1996, a correção do solo foi novamente realizada com base em análises químicas, especialmente para os tratamentos com calcário e calcário mais gesso. A substituição de CaO do calcário pelo CaO do gesso seguiu o mesmo procedimento do início do experimento. A correção foi implementada nos casos em que a saturação por bases estava abaixo de 60%, visando elevar esse índice para 70%.

A correção do solo foi baseada na caracterização química da área experimental. Nos anos de 1992 a 1996 foram manualmente semeadas em dezembro-janeiro espécies de adubos verdes (mucuna-preta, guandu, aveia-preta e feijão-de-porco). E nos anos de 1997, 1998 e 1999 foram semeadas a cultura do milho (*Zea mays*), a aveia-preta (*Avena strigosa*) e a braquiária (*Urochloa decumbens*), respectivamente.

Em 2006, começaram a aparecer naturalmente espécies arbóreas nativas de cerrado, como indicadores de qualidade do Latossolo Vermelho distrófico. Nos anos de 2008 a 2012 foram estudados alguns atributos físicos e químicas do solo; massa seca da braquiária e a altura e diâmetro dessas espécies. A partir de 1999 até o momento, a área encontra cultivada com *Urochloa decumbens* (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

Figura 4.3 - Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,6 m de espessura.



Fonte: Bonini (2015).

Tabela 4.1 - Caracterização inicial (1992). Selvíria – MS.

Prof (m)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	Microporosidade (m ³ m ⁻³)	Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	Densidade do solo (mg dm ⁻³)
0.00-0.10	0,10	0,25	0,35	1,52
0.10-0.20	0,08	0,25	0,33	1,69
0.20-0.40	0,07	0,26	0,33	1,74

Fonte: Alves, (2001).

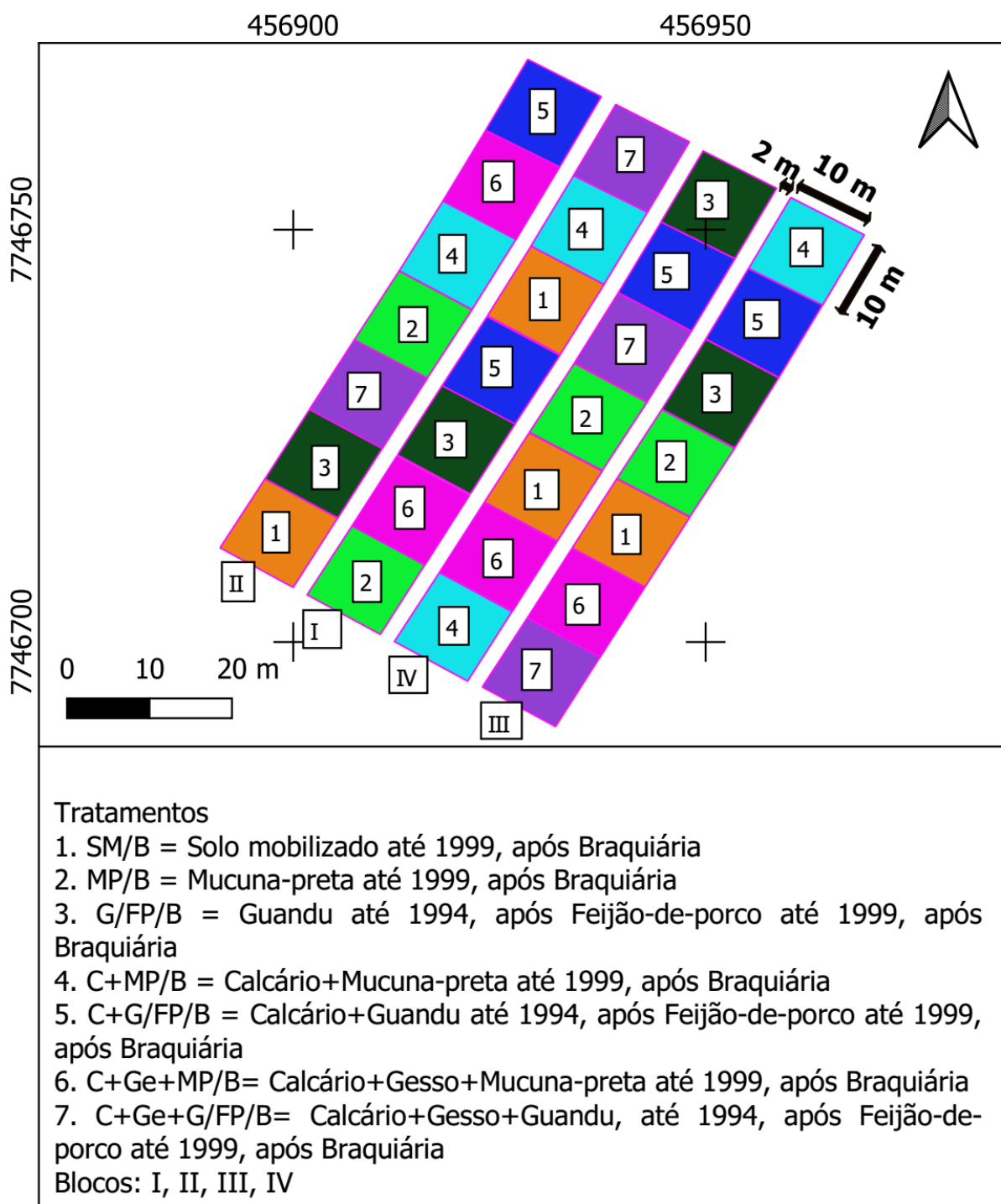
O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com espaçamento de 2m entre si, utilizando o tempo no esquema de parcela subdividida, tendo a aplicação de sete tratamentos com quatro repetições, sendo eles descritos a seguir: SM/B = Solo mobilizado até 1999, após implantada Braquiária (*Urochloa decumbens*); MP/B = Mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy) até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/B = Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/B = Calcário + Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/B = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/B= Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/B=

Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*. Após 2010 iniciou o povoamento de espécies arbóreas nativas na área (Figura 4.4).

Para as análises foram coletadas amostras indeformadas de solo, com anel volumétrico, em três camadas de solo: 0,00–0,10; 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m e em quatro repetições por tratamento, totalizando 84 amostras/ano. As amostragens foram realizadas em 1992, 1993, 1995, 1997, 1998, 2008, 2009, 2010, 2011, 2022 e 2023 (ALVES, 2001; BONINI, 2012). Para a realização das análises físicas foi utilizado o laboratório da Unesp do campus de Dracena.

Foram coletadas amostras de duas testemunhas: solo exposto (sem aplicação de técnicas de recuperação) e vegetação nativa de Cerrado. No entanto, para a análise temporal dos atributos físicos, optou-se por não utilizar essas amostras, uma vez que nos anos de 1992, 1993, 1995, 1997 e 1998 não foram realizadas avaliações que permitissem estabelecer comparações ao longo do período em análise.

Figura 4.4 - Croqui da Área Experimental. Selvíria-MS, 2023.



Fonte: Próprio autor (2023).

4.2.2 Atributos físicos do solo estudados

a) Porosidade total, Microporosidade e Macroporosidade do solo

A porosidade total foi determinada pela saturação do solo com água (volume de poros totais do solo ocupado pela água), assim a amostra contida no cilindro foi preparada de forma a nivelar as duas superfícies, e na parte inferior foi colocado um tecido apropriado preso com liga de borracha, anteriormente pesado, a esse conjunto denomina-se amostra-cilindro-tecido-liga (Figura 4.5). Em seguida, esse conjunto foi tampado com tampa de alumínio e acomodado em bandeja plástica e adicionou água até 1 cm de coluna do anel. Aguardou-se a ascensão capilar da água até o topo da amostra. Quando atingiu o topo, se completou a bandeja com água até que o nível ficasse próximo à borda do cilindro, e ficando por 12 horas. Retirou-se a amostra, a qual foi pesada e levada à estufa a 105 °C até atingir peso constante. As amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecador até o completo resfriamento. O conjunto amostra-cilindro-tecido-liga foi pesado, em sequência, se realizaram os cálculos conforme Equação 4.1.

$$P_t = \frac{[(a-b)-(c-d)]}{e} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde: **P_t** – Porosidade total, em m³ m⁻³. **a** – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado, em kg. **b** – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg. **c** – massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg. **d** – massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg. **e** – volume total da amostra, em m³.

O volume total da amostra é igual ao volume do cilindro, que pode ser estimado pela Equação 4.2.

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde: **V_c** – volume do cilindro, em m³. **r** – raio do cilindro, em m. **h** – altura do cilindro, em m.

A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 6 kPa, onde após a determinação da massa de água retida em amostra de solo de volume conhecido, no tempo de equilíbrio na mesa de tensão, por pesagem, foi realizado a saturação das amostras não deformadas e aplicação

de tensão de 0,60 m de coluna de água, que serão pesadas após equilíbrio e calculadas pela Equação 4.3.

$$M_i = \frac{(a-b)}{c} \quad (\text{Equação 4.3})$$

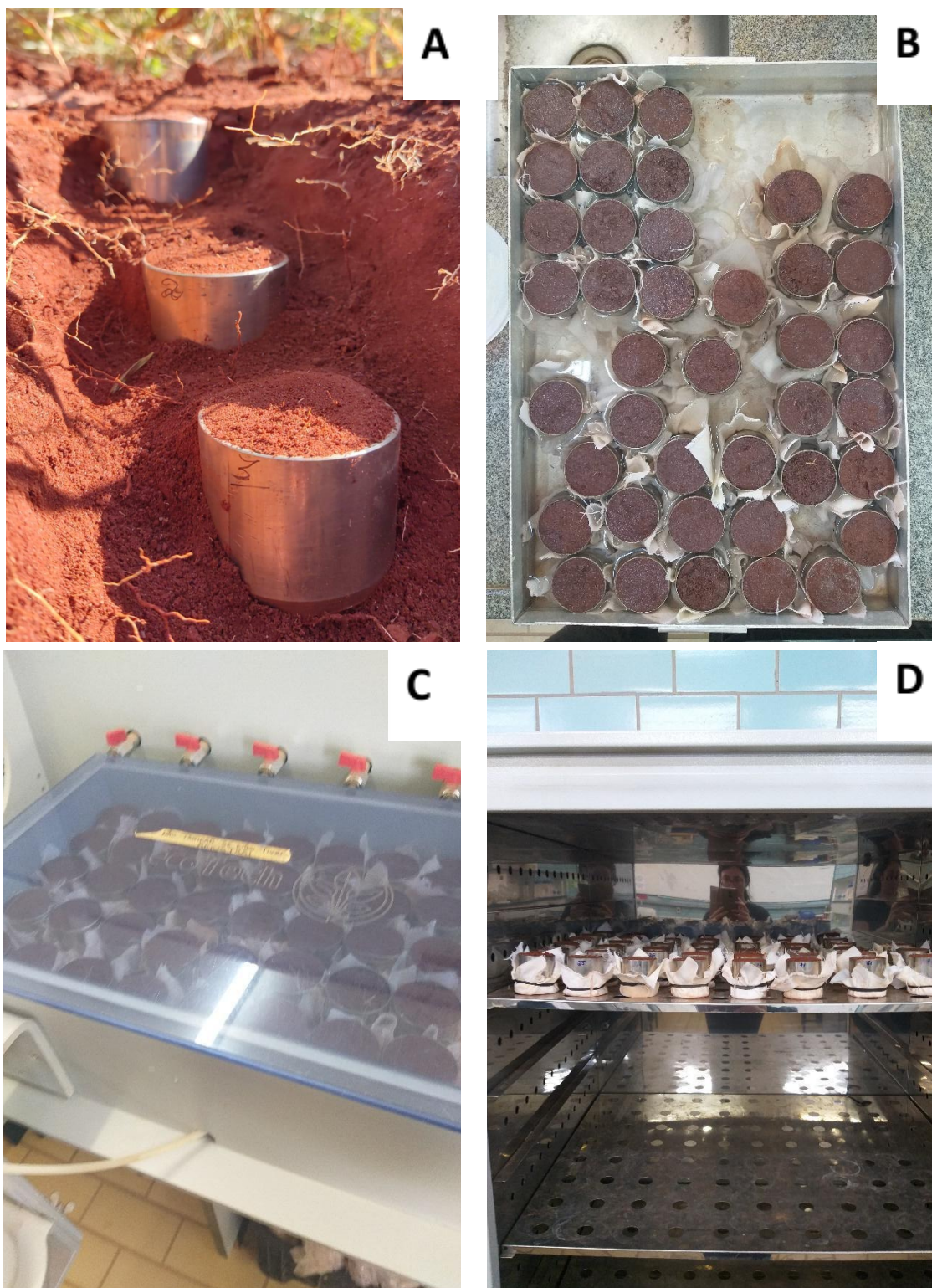
Onde: **M_i** – microporosidade, em m³ m⁻³. **a** – massa do solo seco + água retida, após equilíbrio com um potencial de 6 kPa (60 cm de coluna de água), em g. **b** – massa do solo seco a 105 °C, em g. **c** – volume total da amostra, em cm³ (nesse caso, assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro).

E a macroporosidade foi calculada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade, conforme Equação 4.4, todos esses atributos seguirão a metodologia de TEIXEIRA *et al.* (2017).

$$M_a = (Pt - M_i) \quad (\text{Equação 4.4})$$

Onde: **M_a** – macroporosidade, em m³ m⁻³. **Pt** – porosidade total, em m³ m⁻³. **M_i** – microporosidade, em m³ m⁻³

Figura 4.5 - A: trincheira para coleta de amostras indeformadas; B: anéis saturados em água; C: amostras na mesa de tensão; D: amostras na estufa.



Fonte: Próprio autor (2023).

b) Densidade do solo

A obtenção da densidade do solo envolve duas etapas: massa e volume da amostra, e foi determinada pelo método do anel volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A massa é obtida por meio da pesagem após secagem em estufa, e o volume, por meio da medida do volume interno do cilindro metálico utilizado na coleta. A coleta da amostra ocorreu com um cilindro metálico, em que se utilizou um paquímetro para medir e anotar, em triplicata, as dimensões do cilindro. Em seguida, a amostra foi removida do cilindro e transferida para um recipiente numerado e de massa conhecida, para ser secado em estufa a 105 °C por 48 horas, após deve-se retirar, deixar esfriar em dessecador e pesar. E pela aplicação da Equação 4.5 obterá a densidade do solo.

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde: **D_s** – densidade do solo, em kg dm⁻³ (equivalente a g cm⁻³); **m_a** – massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g; **V** – volume do cilindro, em cm³.

4.2.3 Análise estatística

Os dados foram testados quanto à normalidade dos erros e homogeneidade de variância e as análises estatísticas foram realizadas por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2011). Os resultados foram submetidos a ANOVA, constatado significância, foi aplicado o teste de Scott-Knott para as comparações de média no nível de 5 % de probabilidade (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002).

4.3 Resultados e Discussão

Na análise de variância (ANOVA) para os tratamentos estudados, houve significância somente para microporosidade (0,10-0,20 e 0,20-0,40m), macroporosidade, porosidade total na camada de 0,20-0,40m. Diferentemente, para os anos houve significância para todos os atributos e interação para porosidade total e densidade do solo na primeira camada e todos os atributos da camada de 0,20-0,40m (Tabela 4.2).

Para a macroporosidade, o limite foi considerado a $0,10 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ (Baver *et al.*, 1972), dessa maneira, resultados inferiores limitam o crescimento radicular e aeração do solo prejudicando o processo de recuperação do solo. Para os tratamentos estudados nota-se que a macroporosidade está acima do limite considerado crítico e quando analisado os anos, nota-se um reflexo do manejo adotado até 1998 foram realizados cultivos e preparo de solo, com aumento significativo desse atributo, já em 2008 a área estava sendo cultivada por *Urochloa decumbens* e o que se constata é que o efeito do sistema radicular foi o que influenciou positivamente a distribuição do tamanho de poros (Tabela 4.2).

Na camada de 0-0,10m a macroporosidade demonstrou valores superiores ao limite em todos os anos analisados. Nota-se uma evolução no período de 1995 a 1998, período em que ocorreu a semeadura de mucuna-preta, guandu, aveia-preta e feijão-de-porco (Figura 4.2). No ano de 2008, a macroporosidade retornou ao valor padrão de $0,10 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

Para a camada de 0,10-0,20m, os valores de macroporosidade permaneceram abaixo do limite crítico até o ano de 1997, alcançando um valor de $0,12 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ em 1998. Este último indicou uma melhora na recuperação do solo após sete anos de aplicação dos tratamentos. Entre 2008 e 2011, a presença de espécies espontâneas na área em recuperação, incluindo a *Urochloa decumbens* introduzida em 1999, não impediu a redução desse atributo. No ano de 2022, entretanto, observou-se um resultado acima do limite crítico, mantendo as espécies de cobertura do solo.

Quanto à camada de 0,20-0,40m, os resultados permaneceram consistentemente abaixo do valor crítico de 1992 a 2022, e atingindo o limite estabelecido para a macroporosidade somente no ano de 2023. Nessa camada, foram necessários trinta anos após intervenção antrópica para que ocorresse uma notável melhoria no processo de recuperação do solo.

A microporosidade do solo não sofre influência do manejo, entretanto, serve como um indicador crucial da degradação do solo, pois quando a macroporosidade diminui, a micro consequentemente aumenta. A proporção ideal corresponde a $\frac{2}{3}$ da porosidade total do solo. Verifica-se que os valores obtidos estão dentro da proporção ideal para essa classe textural de solo.

A porosidade total é a combinação da macro e da microporosidade, portanto, não se pode concluir que níveis elevados de porosidade do solo automaticamente

sinalizam sua condição ideal, o melhor fica em torno de 50%, mas a distribuição do tamanho dos poros desempenha um papel crucial na avaliação da qualidade da estrutura do solo.

A densidade do solo exerce influência direta na infiltração e retenção de água no solo, bem como indica seu arranjo das partículas e poros, visto que permite avaliar a suscetibilidade a processos erosivos (FREITAS; MELLONI; MELLONI, 2021). Para Reichert *et al.* (2003), a densidade considerada crítica corresponde a $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ (dessa maneira, resultados superiores limitam o bom desenvolvimento do sistema radicular). Para os tratamentos estudados não houve diferença significativa, mas para os anos, a diferença foi expressiva e houve redução nos valores médios.

Na camada de 0-0,10m, os valores de densidade do solo ficaram abaixo do limiar crítico em todos os anos analisados. Houve uma diminuição desse atributo ao longo do período de 1992 a 1995, seguida por aumentos em 1997, 2008 e 2011. Durante o período avaliado, observou-se uma oscilação entre incrementos e reduções nesse atributo, possivelmente atribuída a efeitos mecânicos no solo, alcançando seu valor mínimo em 2023.

Para a camada de 0,10-0,20m, entre 1992 e 2008, a densidade do solo permaneceu acima de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, experimentando uma redução em 2009, seguida por um novo aumento. Destaca-se que foram necessários dezoito anos para que essa camada demonstrasse uma melhora na recuperação do solo. Após os anos de 2010 e 2011, esse atributo voltou a diminuir, alcançando $1,46 \text{ g cm}^{-3}$ em 2023, ainda que superior ao resultado de 2009. É importante salientar que, ao longo do período de 1999 a 2023, não ocorreram alterações na cultura, mantendo a área povoada com *Urochloa decumbens* e espécies espontâneas.

Quanto à camada de 0,20-0,40m, durante o período de 1992 a 2022, esse atributo permaneceu acima do limite crítico, sofrendo uma redução apenas em 2023. Isso implica que foram necessários trinta anos de processo de recuperação para que essa camada apresentasse uma melhora na densidade do solo.

Ao longo dos anos estudados, compreende-se que a evolução dos atributos estudados foi mais efetiva na camada superficial, mostrando que o efeito das raízes das espécies cultivadas foram cruciais para o fornecimento de agentes cimentantes e força mecânica na agregação do solo e consequentemente aumento da

macroporosidade. Conforme informações apresentadas na Tabela 4.1 observa-se que em todos os tratamentos houve uma melhora na recuperação do solo.

Na Tabela 4.3 tem-se o desdobramento da interação significativa entre ano de avaliação e tratamento aplicado, referente a macroporosidade nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Os resultados iguais e superiores ao limite de $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ indicam uma evolução satisfatória na recuperação do solo degradado.

Na camada de 0,00-0,10m, o solo mobilizado revelou valores inferiores aos obtidos com os tratamentos aplicados, sendo evidente a influência do tempo. Observou-se um aumento de 1992 a 1998, uma redução em 2008 e um subsequente aumento de 2009 a 2023. Essas variações podem ser interpretadas como um rearranjo das partículas decorrentes do manejo adotado. A macroporosidade, em média, mantém-se com o valor mínimo considerado suficiente para o desenvolvimento das raízes nessa camada.

O aumento da macroporosidade em solos cultivados pode ser atribuído ao afrouxamento do solo promovido pelo preparo e sistema radicular (HU *et al.*, 2021). Por outro lado, a compactação do solo pode afetar negativamente uma série de funções, como o armazenamento e transporte de água, ar, calor e nutrientes no solo. Em 2008 não houve mais revolvimento do solo, a única ação ocorrendo na área em recuperação foi a das raízes da *Urochloa decumbens*, e os tratamentos apresentaram valores semelhantes e bons resultados, concordando com Bisi *et al.* (2019) que os indicadores devem levar em consideração os atributos e processos do solo.

Na profundidade de 0,20 a 0,40 metros, os valores de macroporosidade, ao longo do período de 1992 a 2022, permaneceram aquém da condição mínima considerada suficiente para preservar o desenvolvimento do sistema radicular ($0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), evidenciando a necessidade de melhorias. O processo de recuperação do solo só foi identificado no ano de 2023, enquanto nos anos anteriores, não se observaram melhorias substanciais. Existe a perspectiva de atingir valores próximos ao limite crítico nos próximos anos, embora os tratamentos utilizados até agora não tenham demonstrado variações significativas. Portanto, para obter resultados mais efetivos, deve-se considerar a alteração dos tratamentos para estimular o processo de recuperação.

Resultados obtidos por Drewry *et al.* (2021), ao longo de um período de 19 anos, constataram que os sistemas de uso do solo não alteraram a

macroporosidade nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m, e que mais tempo é necessário para obter resultados expressivos. Neste trabalho, verificou-se que o estudo na recuperação do solo obteve êxito na primeira camada (0-0,10m) e pouca ou nenhuma melhora na camada 0,20-0,40 m.

Tabela 4.2 - Valores médios para a macroporosidade – MA ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), microporosidade – MI ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), porosidade total - PT ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), densidade do solo – DS (kg dm^{-3}), teste F e coeficiente de variação (CV%), nas camadas de solo estudadas (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m), Selvíria - MS. 1992 a 2023.

Tratamentos	MA	MI	PT	DS	MA	MI	PT	DS	MA	MI	PT	DS
	0-0,10 m				0,10-0,20 m				0,20-0,40 m			
SM/B	0,14	0,29	0,43	1,41	0,09	0,27 b	0,37	1,57	0,07 a	0,26 b	0,33 b	1,72
MP/B	0,14	0,28	0,43	1,39	0,10	0,27 b	0,37	1,52	0,07 a	0,29 a	0,36 a	1,65
G/FP/B	0,13	0,29	0,43	1,42	0,09	0,30 a	0,39	1,55	0,07 a	0,27 b	0,33 b	1,70
C+MP/B	0,14	0,27	0,42	1,40	0,09	0,26 b	0,35	1,55	0,05 b	0,26 b	0,32 b	1,74
C+G/FP/B	0,14	0,28	0,42	1,43	0,09	0,27 b	0,37	1,54	0,07 a	0,26 b	0,34 b	1,72
C+Ge+MP/B	0,14	0,28	0,43	1,42	0,10	0,26 b	0,36	1,54	0,06 b	0,27 b	0,33 b	1,77
C+Ge+G/FP/B	0,14	0,28	0,43	1,39	0,09	0,26 b	0,36	1,56	0,06 b	0,27 b	0,33 b	1,71
	Ano											
1992	0,10 d	0,25 d	0,37 d	1,51 d	0,08 c	0,25 b	0,33 c	1,68 c	0,06 b	0,25 c	0,32 b	1,74 c
1993	0,11 d	0,32 a	0,44 b	1,40 b	0,06 d	0,29 a	0,36 b	1,63 c	0,05 c	0,29 a	0,34 a	1,71 c
1995	0,19 a	0,25 d	0,44 b	1,37 b	0,09 c	0,27 a	0,36 b	1,64 c	0,05 c	0,27 b	0,33 b	1,77 c
1997	0,17 b	0,24 d	0,41 c	1,46 c	0,07 c	0,27 a	0,35 b	1,70 c	0,06 b	0,27 b	0,34 a	1,76 c
1998	0,18 a	0,25 d	0,43 b	1,40 b	0,12 b	0,26 b	0,39 b	1,56 b	0,06 b	0,28 b	0,34 a	1,77 c
2008	0,10 d	0,30 b	0,41 c	1,46 c	0,06 d	0,30 a	0,36 b	1,65 c	0,04 c	0,30 a	0,35 a	1,73 c
2009	0,12 d	0,30 b	0,42 b	1,44 c	0,08 c	0,21 b	0,30 c	1,08 a	0,04 c	0,29 a	0,34 a	1,77 c
2010	0,14 c	0,29 b	0,43 b	1,37 b	0,08 c	0,29 a	0,37 b	1,58 b	0,06 b	0,29 a	0,35 a	1,72 c
2011	0,13 c	0,26 c	0,40 c	1,44 c	0,08 c	0,30 a	0,38 b	1,56 b	0,06 b	0,28 b	0,34 a	1,73 c
2022	0,14 c	0,30 b	0,44 b	1,33 a	0,16 a	0,29 a	0,45 a	1,48 b	0,09 a	0,24 c	0,34 a	1,63 b
2023	0,16 b	0,34 a	0,50 a	1,31 a	0,13 b	0,25 b	0,38 b	1,46 b	0,10 a	0,20 d	0,30 c	1,54 a
F trat (T)	0,43 ^{ns}	1,77 ^{ns}	0,55 ^{ns}	1,10 ^{ns}	0,44 ^{ns}	3,26*	2,56 ^{ns}	0,77 ^{ns}	3,11*	10,02*	5,08*	3,69 ^{ns}
F ano (A)	14,60*	34,46*	27,85*	17,01*	21,05*	4,78*	5,94*	12,44*	25,66*	37,69*	5,09*	10,90*
F T x A	0,65 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,98*	1,26*	0,70 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,20 ^{ns}	2,10*	2,37*	2,12*	0,86*
CV1(%)	26,34	9,00	6,88	6,56	35,85	17,88	14,97	8,57	26,00	8,45	10,88	7,57
CV2(%)	29,72	10,64	7,35	5,46	36,60	23,75	22,24	16,78	29,51	8,98	9,35	6,70

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade.

Legenda: SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U= Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U= Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor (2023).

Tabela 4.3 - Desdobramento da interação entre ano de avaliação e tratamento referente aos valores médios de macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Selvíria - MS. 1992 a 2023.

Ano/ Tratamento	SM/B	MP/B	G/FP/B	C+MP/B	C+G/FP/B	C+Ge+MP /B	C+Ge+G/FP/ B
(MACRO) 0,00-0,10 m							
1992	0,10 aB	0,10 aB	0,10 aB	0,10 aB	0,10 aA	0,10 aB	0,10 aB
1993	0,11 aB	0,14 aB	0,10 aB	0,09 aB	0,11 aA	0,08 aB	0,13 aB
1995	0,18 aA	0,21 aA	0,19 aA	0,21 aA	0,16 aA	0,17 aA	0,18 aA
1997	0,16 aA	0,17 aA	0,15 aA	0,15 aB	0,15 aA	0,18 aA	0,20 aA
1998	0,17 bA	0,19 bA	0,17 bA	0,25 aA	0,16 bA	0,17 bA	0,16 bA
2008	0,09 aB	0,08 aB	0,09 aB	0,11 aB	0,13 aA	0,10 aB	0,11 aB
2009	0,11 aB	0,13 aB	0,13 aA	0,10 aB	0,12 aA	0,12 aB	0,11 aB
2010	0,16 aA	0,13 aB	0,15 aA	0,14 aB	0,14 aA	0,14 aA	0,12 aB
2011	0,12 aB	0,12 aB	0,12 aB	0,13 aB	0,14 aA	0,11 aB	0,12 aB
2022	0,14 aA	0,15 aA	0,14 aA	0,13 aB	0,14 aA	0,13 aB	0,13 aB
2023	0,15 aA	0,16 aA	0,16 aA	0,15 aB	0,15 aA	0,19 aA	0,16 aA
(MACRO) 0,20-0,40 m							
1992	0,06 aB	0,06 aB	0,06 aB	0,06 aB	0,06 aC	0,06 aC	0,06 aB
1993	0,04 aB	0,05 aB	0,04 aB	0,04 aB	0,04 aC	0,05 aC	0,06 aB
1995	0,05 aB	0,06 aB	0,07 aA	0,04 aB	0,04 aC	0,05 aC	0,04 aB
1997	0,09 aA	0,05 bB	0,05 bB	0,05 bB	0,10 aB	0,07 aB	0,05 bB
1998	0,05 aB	0,06 aB	0,08 aA	0,05 aB	0,04 aC	0,05 aC	0,05 aB
2008	0,03 aB	0,05 aB	0,04 aB	0,05 aB	0,06 aC	0,04 aC	0,05 aB
2009	0,04 aB	0,06 aB	0,05 aB	0,04 aB	0,04 aC	0,04 aC	0,04 aB
2010	0,06 aB	0,06 aB	0,05 aB	0,05 aB	0,05 aC	0,06 aC	0,05 aB
2011	0,07 aB	0,05 aB	0,05 aB	0,05 aB	0,05 aC	0,06 aC	0,07 aA
2022	0,09 bA	0,10 bA	0,09 bA	0,08 bA	0,16 aA	0,07 bB	0,07 bA
2023	0,10 aA	0,12 aA	0,10 aA	0,08 aA	0,09 aB	0,10 aA	0,10 aA

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade. SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U = Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U = Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor (2023).

Na Tabela 4.4 encontra-se o desdobramento da interação significativa entre ano de avaliação e tratamento aplicado, referente a microporosidade nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Na primeira camada de solo se observa um aumento dos

valores no ano de 2023 e que não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, enquanto que, na camada de 0,20-0,40m a microporosidade reduziu em 2023 porque aumentou a macroporosidade, comportamento que era esperado para garantir o balanço entre macro e micro.

A Tabela 4.5 apresenta o desdobramento da interação significativa entre ano de avaliação e tratamento aplicado, referente a porosidade total nas camadas em duas camadas distintas, 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m.

Na primeira camada, observa-se um aumento inicial da porosidade total seguido de uma diminuição. No período de 1992 a 2011, não foram identificadas diferenças significativas entre os tratamentos. No entanto, no ano de 2023, o tratamento com calcário+gesso+mucuna destacou-se em relação aos demais, o que corrobora com os resultados encontrados na macroporosidade e observados nos últimos anos.

De forma análoga, Gu *et al.* (2019) em um estudo conduzido ao longo de 45 anos, verificaram porosidade total menores em terras agrícolas devido à compactação do solo, enquanto as áreas vegetadas apresentaram os maiores valores, graças ao acúmulo de matéria orgânica nos solos que vão ao encontro dos valores observados neste trabalho.

Na camada de 0,20-0,40 m, os valores permaneceram relativamente estáveis, variando entre 0,32 e 0,35 m³.m⁻³. Houve um aumento de 1992 a 2009, seguido por uma diminuição até o ano de 2023, independentemente dos tratamentos aplicados. Nota-se que o tratamento com mucuna se destacou em relação aos demais. Diferentemente de Jourgholami, Glassemi e Labelle (2019) que identificaram estabilidade da porosidade total do solo em áreas onde foram plantadas *Acer velutinum* Boiss e *Cupressus sempervirens* L. var. *horizontalis* (Mill.) Gord. não apresentando recuperação significativa após 25 anos de cultivo.

Tabela 4.4 - Desdobramento da interação entre ano de avaliação e tratamento referente aos valores médios de microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Selvíria - MS. 1992 a 2023.

Ano/ Tratament o	SM/B	MP/B	G/FP/B	C+MP/B	C+G/FP/B	C+Ge+M P/B	C+Ge+G/ FP/B
(MICRO) 0,00-0,10 m							
1992	0,25 aB	0,25 aC	0,25 aB	0,25 aB	0,25 aB	0,25 aD	0,25 aB
1993	0,33 aA	0,30 aB	0,32 aA	0,32 aA	0,34 aA	0,34 aB	0,30 aA
1995	0,26 aB	0,24 aC	0,26 aB	0,22 aB	0,26 aB	0,26 aD	0,25 aB
1997	0,25 aB	0,24 aC	0,25 aB	0,24 aB	0,25 aB	0,22 aD	0,22 aB
1998	0,26 aB	0,26 aC	0,25 aB	0,22 aB	0,25 aB	0,25 aD	0,25 aB
2008	0,32 aA	0,32 aB	0,31 aA	0,30 aA	0,28 aB	0,29 aC	0,31 aA
2009	0,32 aA	0,30 aB	0,31 aA	0,29 aA	0,30 aA	0,28 aC	0,30 aA
2010	0,29 aB	0,30 aB	0,29 aA	0,28 aA	0,28 aB	0,29 aC	0,30 aA
2011	0,26 aB	0,27 aC	0,28 aA	0,26 aB	0,26 aB	0,25 aD	0,27 aB
2022	0,28 aB	0,27 aC	0,29 aA	0,29 aA	0,30 aA	0,31 aB	0,32 aA
2023	0,33 aA	0,35 aA	0,34 aA	0,31 aA	0,33 aA	0,37 aA	0,32 aA
(MICRO) 0,20-0,40 m							
1992	0,25 aB	0,25 aB	0,25 aB	0,25 aA	0,25 aB	0,25 aB	0,25 aA
1993	0,27 bA	0,32 aA	0,27 bB	0,29 aA	0,30 aA	0,27 bB	0,30 aA
1995	0,28 aA	0,27 aB	0,27 aB	0,26 aA	0,26 aB	0,28 aB	0,27 aA
1997	0,24 aB	0,30 aA	0,26 aB	0,27 aA	0,28 aA	0,26 aB	0,29 aA
1998	0,28 aA	0,30 aA	0,28 aB	0,27 aA	0,26 aB	0,26 aB	0,28 aA
2008	0,30 aA	0,33 aA	0,31 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,30 aA
2009	0,30 aA	0,30 aA	0,29 aA	0,28 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,30 aA
2010	0,29 aA	0,29 aA	0,30 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,29 aA	0,29 aA
2011	0,26 aA	0,29 aA	0,28 aB	0,29 aA	0,28 aA	0,26 aB	0,27 aA
2022	0,24 bB	0,33 aA	0,21 bC	0,19 bB	0,22 bC	0,31 aA	0,21 bB
2023	0,21 bC	0,25 aB	0,20 bC	0,16 cB	0,18 cD	0,21 bC	0,20 bB

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade. SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U = Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U = Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor, (2023).

Tabela 4.5 - Desdobramento da interação entre ano de avaliação e tratamento referente aos valores médios de porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Selvíria - MS. 1992 a 2023.

Ano/ Tratamento	SM/B	MP/B	G/FP/B	C+MP/B	C+G/FP/B	C+Ge+MP/ B	C+Ge+G/FP /B
(PT) 0,00-0,10 m							
1992	0,37 aB	0,37 aC	0,37 aC	0,37 aB	0,37 aB	0,37 aC	0,37 aB
1993	0,45 aA	0,45 aB	0,42 aC	0,42 aB	0,45 aA	0,43 aB	0,44 aA
1995	0,44 aA	0,46 aB	0,45 aB	0,44 aA	0,43 aA	0,44 aB	0,44 aA
1997	0,42 aA	0,41 aC	0,40 aC	0,40 aB	0,41 aB	0,41 aC	0,43 aB
1998	0,43 aA	0,45 aB	0,42 aC	0,47 aA	0,42 aB	0,42 aC	0,41 aB
2008	0,42 aA	0,40 aC	0,41 aC	0,41 aB	0,42 aB	0,40 aC	0,42 aB
2009	0,43 aA	0,43 aB	0,44 aB	0,40 aB	0,43 aA	0,41 aC	0,42 aB
2010	0,46 aA	0,44 aB	0,44 aB	0,43 aB	0,42 aB	0,44 aB	0,43 aB
2011	0,38 aB	0,40 aC	0,40 aC	0,41 aB	0,38 aB	0,39 aC	0,41 aB
2022	0,43 aA	0,43 aB	0,43 aC	0,43 aA	0,44 aA	0,45 aB	0,46 aA
2023	0,48 bA	0,51 bA	0,50 bA	0,47 bA	0,49 bA	0,56 aA	0,48 bA
(PT) 0,20-0,40 m							
1992	0,32 aA	0,32 aC	0,32 aB	0,32 aA	0,32 aB	0,32 aA	0,32 aB
1993	0,32 aA	0,37 aC	0,32 aB	0,33 aA	0,35 aA	0,32 aA	0,36 aA
1995	0,34 aA	0,33 aC	0,35 aA	0,31 aA	0,31 aB	0,33 aA	0,32 aB
1997	0,33 aA	0,32 aC	0,32 aB	0,33 aA	0,38 aA	0,34 aA	0,34 aA
1998	0,34 aA	0,36 aC	0,36 aA	0,32 aA	0,33 aA	0,31 aA	0,34 aA
2008	0,33 aA	0,38 aB	0,35 aA	0,34 aA	0,35 aA	0,33 aA	0,35 aA
2009	0,34 aA	0,36 aC	0,35 aA	0,33 aA	0,34 aA	0,34 aA	0,34 aA
2010	0,35 aA	0,35 aC	0,35 aA	0,34 aA	0,35 aA	0,36 aA	0,34 aA
2011	0,33 aA	0,34 aC	0,33 aB	0,35 aA	0,34 aA	0,32 aA	0,34 aA
2022	0,33 cA	0,43 aA	0,30 dB	0,27 dB	0,39 bA	0,38 bA	0,29 dB
2023	0,31 bA	0,37 aC	0,31 bB	0,25 cB	0,28 cB	0,32 bA	0,30 bB

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade. SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U = Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U = Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor, (2023).

A Tabela 4.6 tem-se o desdobramento da interação significativa entre ano de avaliação e tratamento aplicado, referente a densidade em duas camadas distintas, 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m. Na camada de 0,00-0,10 m, todos os valores se mantiveram abaixo do limite crítico de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$. Entre 1992 e 1998, houve uma

diminuição seguida por um aumento em 2008, e novamente uma diminuição em 2022 e 2023. De modo geral, a densidade do solo diminuiu ao longo dos anos, indicando uma recuperação da estrutura do solo e uma melhoria na distribuição de poros. Em relação aos tratamentos, as parcelas com mucuna, guandu, calcário+mucuna e calcário+gesso+guandu não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Na camada de 0,20-0,40 m, todos os valores da densidade do solo estavam acima do limite crítico, e houve uma melhora apenas em 2023. Essa melhora corrobora com os resultados obtidos para a macroporosidade, que também teve influência dos tratamentos somente em 2023, na camada mais profunda. Sabe-se que quanto aumenta a macroporosidade, a densidade do solo reduz, principalmente a quantidade dos espaços porosos presentes (Pelinson *et al.*, 2021). Resultados contrastantes foram relatados por Keller *et al.* (2021) que verificaram um aumento na densidade do solo na Suíça, devido à compactação do solo nas profundidades de 0,1 e 0,3 m, o que contribuiu para a redução da porosidade do solo.

Observa-se que a densidade do solo é um atributo que varia com o manejo adotado e Drewry *et al.* (2021) verificaram um aumento da densidade do solo ao longo do tempo em alguns tipos de uso e manejo do solo, mas em áreas de silvicultura, houve uma diminuição da densidade e um aumento na macroporosidade do solo devido ao não revolvimento do solo e aumento da matéria orgânica.

Tabela 4.6 - Desdobramento da interação entre ano de avaliação e tratamento referente aos valores médios de densidade do solo (kg dm^{-3}), nas camadas de 0,00-0,10 e 0,20-0,40m. Selvíria - MS. 1992 a 2023. Fonte: Próprio autor (2023).

Ano/ Tratamento	SM/B	MP/B	G/FP/B	C+MP/B	C+G/FP/B	C+Ge+MP /B	C+Ge+G/FP/ B
(DS) 0,00-0,10 m							
1992	1,51 aB	1,51 aB	1,51 aB	1,51 aB	1,51 aB	1,51 aB	1,51 aB
1993	1,35 aA	1,36 aA	1,42 aA	1,44 aB	1,39 aA	1,46 aB	1,40 aB
1995	1,33 aA	1,32 aA	1,41 aA	1,36 aA	1,42 aA	1,40 aB	1,38 aB
1997	1,48 aB	1,43 aB	1,52 aB	1,49 aB	1,48 aB	1,43 aB	1,37 aB
1998	1,39 bA	1,37 bA	1,41 bA	1,28 aA	1,46 bB	1,44 bB	1,46 bB
2008	1,47 aB	1,43 aB	1,47 aB	1,45 aB	1,50 aB	1,47 aB	1,47 aB
2009	1,42 aB	1,48 aB	1,37 aA	1,50 aB	1,39 aA	1,48 aB	1,46 aB
2010	1,33 aA	1,36 aA	1,40 aA	1,41 aB	1,39 aA	1,35 aA	1,38 aB
2011	1,48 aB	1,45 aB	1,45 aB	1,38 aA	1,47 aB	1,43 aB	1,43 aB
2022	1,32 bA	1,35 bA	1,37 bA	1,35 bA	1,42 bA	1,27 aA	1,25 aA
2023	1,39 bA	1,26 aA	1,30 aA	1,29 aA	1,34 bA	1,38 bA	1,24 aA
(DS) 0,20-0,40 m							
1992	1,74 aB	1,74 aB	1,74 aA	1,74 aB	1,74 aA	1,74 aA	1,74 aB
1993	1,76 aB	1,61 aA	1,78 aA	1,74 aB	1,71 aA	1,75 aA	1,66 aB
1995	1,75 aB	1,73 aB	1,68 aA	1,84 aB	1,81 aA	1,74 aA	1,80 aB
1997	1,75 aB	1,72 aB	1,82 aA	1,84 aB	1,62 aA	1,80 aA	1,79 aB
1998	1,75 aB	1,68 aB	1,63 aA	1,82 bB	1,77 aA	1,92 bA	1,83 bB
2008	1,80 aB	1,57 aA	1,73 aA	1,77 aB	1,73 aA	1,83 aA	1,70 aB
2009	1,82 aB	1,69 aB	1,72 aA	1,80 aB	1,75 aA	1,84 aA	1,81 aB
2010	1,72 aB	1,67 aB	1,73 aA	1,73 aB	1,72 aA	1,76 aA	1,70 aB
2011	1,73 aB	1,71 aB	1,75 aA	1,69 aB	1,76 aA	1,81 aA	1,69 aB
2022	1,60 aA	1,55 aA	1,62 aA	1,70 aB	1,67 aA	1,75 aA	1,52 aA
2023	1,57 aA	1,46 aA	1,55 aA	1,45 aA	1,62 aA	1,57 aA	1,54 aA

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e letras minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade. SM/U = Solo mobilizado até 1999, após implantada *Urochloa decumbens*; MP/U = Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; G/FP/U = Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+MP/U = Calcário+Mucuna-preta até 1999, após substituída por *Urochloa decumbens*; C+G/FP/U = Calcário+Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*; C+Ge+MP/U = Calcário+Gesso+Mucuna-preta até 1999 após substituída por *Urochloa decumbens*; C+Ge+G/FP/U = Calcário+Gesso Guandu, até 1994, após substituído por Feijão-de-porco e a partir de 1999 substituído por *Urochloa decumbens*.

Fonte: Próprio autor, (2023).

Ao analisar as diferentes profundidades, nota-se um aumento na densidade do solo. Esse padrão é natural, uma vez que, com o aumento da profundidade no

perfil do solo, ocorre uma redução no teor de matéria orgânica. Além disso, o peso das camadas de solo sobrepostas contribui para o aumento da densidade.

Entretanto a recuperação da qualidade do solo é difícil de ser alcançada, como constatada neste trabalho em maior profundidade e por Jourgholami, Glassemi e Labelle (2019) que mesmo após 25 anos de cultivo, a densidade do solo não se recuperou completamente e ainda superou as áreas não trafegadas ou de controle.

A quantidade e a qualidade da matéria orgânica desempenham um papel crucial na recuperação da estrutura do solo. Até o momento, observa-se uma produção semelhante entre os tratamentos, indicando que os produtos resultantes da decomposição dos adubos verdes utilizados, como Mucuna-preta e Feijão-de-porco, provavelmente estão proporcionando efeitos similares na formação da estrutura do subsolo em análise.

A influência da matéria orgânica na agregação do solo é um processo dinâmico. À medida que se incorpora material orgânico ao solo, a atividade microbiana é intensificada, resultando na produção de compostos que desempenham um papel fundamental na formação e estabilização dos agregados (agentes cimentantes). O fornecimento contínuo de material orgânico serve como fonte de energia para a atividade microbiana, que atua como agente estabilizador dos agregados, facilitando a formação de ácidos húmicos e complexos argilo-orgânicos.

4.4 Conclusão

A evolução da distribuição do tamanho de poros em área degradada em recuperação foi eficiente ao longo dos anos estudados, sendo que os efeitos dos tratamentos foram muito expressivos na camada de 0-0,10m.

Os benefícios do processo de recuperação do solo se estenderam até a camada de 0,20-0,40 metros, abrangendo tanto a macroporosidade quanto a densidade do solo, indicando uma recuperação notável após 30 anos de intervenção antrópica.

Os tratamentos estudados foram eficientes na recuperação da estrutura do solo, não diferindo entre si ao longo dos anos avaliados, sinalizando a importância da adição de uma fonte de matéria orgânica nesse processo de recuperação.

Os tratamentos apresentaram melhoria para a macroporosidade na camada de 0,10-0,20m após 7 anos de implantação, período em que a área se encontrava povoada com *Urochloa decumbens* e espécies espontâneas do cerrado. E para a densidade do solo após 18 anos, nesta mesma camada de solo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C. **Recuperação do subsolo de um Latossolo Vermelho usado para terrapleno e fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira - SP**. 2001. 83 f. Tese (Livre Docência em Solos) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.
- ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V.; SOUZA, Z. M. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 887-893, 2012.
- AZERIA, E. T.; SANTALA, K.; MCINTOSH, A. C. S.; AUBIN, I. Plant traits as indicators of recovery of reclaimed wellsites in forested areas: Slow but directional succession trajectory. **Forest Ecology and Management**, v. 468, p. 1-13, 2020.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. **Soil physics**. New York: John Wiley & Sons, 1972. 498 p.
- BISI, B. S.; BONINI, C. S. B.; NETO, A. B.; HEINRICHS, R.; MEIRELLES, G. C.; OLIVERIO, G. L.; MATEUS, G. P.; NASCIMENTO, C. A. S. Pasture recovery using *Stylosanthes* cv. Campo Grande: effect on soil quality. **Animal Science**, Recife, v. 14, n. 4, p. 1-6, 2019.
- BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação das propriedades químicas de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 388 – 93, 2015. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393.
- CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **PUBVET**, Londrina, v. 11, n. 10, p. 1036-1045, 2017.
- CHANDRASHEKAR, G.; SAHIN, F. A. Survey on Feature Selection Methods, **Computers & Electrical Engineering**, v. 40, n. 1, p. 16–28, 2014.
- CHITERO, J. G. M.; BONINI NETO, A.; BONINI, C. S. B.; HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V.; MATEUS, G. P.; BISI, B. S.; COSTA, N. R.; PIAZENTIN, J. C.; MEIRELLES, G. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. . Analysis of the physical recovery of degraded soils via artificial neural networks using a graphical interface. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, p. 1-31, 2020.

DREWRY, J. J.; CAVANAGH, J. E.; MCNEILL, S. J.; STEVENSON, B. A.; GORDON, D. A.; TAYLOR, M. D. Long-term monitoring of soil quality nas trace elements to evaluate land use effects and temporal change um the Wellington region, New Zealand. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 25, p. 1-13, 2021.

FALKER. PenetroLOG - Medidor Eletrônico de Compactação do Solo. Disponível em: <https://www.falker.com.br/produto-penetrolog-medidor-compactacao.php>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Intervalo hídrico ótimo e valores críticos de densidade como indicadores de recuperação de um solo sob sistemas florestais e pasto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FINKLER, R.; PEDROSO, R. M.; STEIN, R. T.; LAZZARINI, P. R. C. **Ciências do solo e fertilidade**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

FONSECA, W. S.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M. Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 30, n. 1, p. 1-12, 2023.

FREITAS, I. C.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Agregação de solo em pastagens sob diferentes índices de qualidade e sua influência na infiltração de água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 14, n. 4, p. 1972-1986, 2021.

GRECH, V.; CALLEJA, N., WASP: Multivariate Analysis, Early Human Development. **Write a Scientific Paper**, v. 123, p. 42–45, 2018.

GU, C.; MU, X.; GAO, P.; ZHAO, G.; SUN, W.; TATARKO, J.; TAN, X. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. **J. Soils Sediments**, v. 19, p. 716-728, 2019.

HU, G.; DREWRY, J.; BEARE, M.; EGER, A.; MULLER, K. Compaction induced soil structural degradation productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study. **Geoderma**, Amsterdam, v. 395, p. 1-15, 2021.

JIM, C. Y.; NG, Y. Y. Porosity of roadside soil as indicator of edaphic quality for tree planting. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 120, p. 364–374, 2018.

JOURGHOLAMI, M.; GHASSEMI, T.; LABELLE, E. R. Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 101, p. 102-110, 2019.

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; SCHYMANSKI, S. J.; WEISSKOPF, P.; KOESTEL, J.; SOMMER, M.; STADELMANN, V.; BREITENSTEIN, D.; KIRCHGESSNER, N.; WALTER, A.; OR, D. Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 85, p. 1002-1020, 2021.

KITAMURA, A. E.; TAVARES, R. L. M.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery of degraded Cerrado soil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 50, n. 8, p. 1-8, 2020.

MAIONE, C.; BARBOSA, F.; BARBOSA, R. M. Predicting the botanical and geographical origin of honey with multivariate data analysis and machine learning techniques: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 157, p. 436–446, 2019.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. **Boletim Informativo da SBCE**, Viçosa, v. 44, n. 1, p. 22-27, 2018.

MÜLLER, F. C.; MORAES, C. S.; VICENTE, L. C.; DIAS, C. S.; MOSCOSO, J. S. C.; TESTONI, S. A.; CHACON, S. F.; TRINDADE, T. F. H. **Uso, manejo e conservação do solo**. Porto Alegre: SAGAH, 2021.

NAIK, A. P., GHOSH, B., PEKKAT, S. Estimating soil hydraulic properties using mini disk infiltrometer. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, Wilmington, v. 25, p. 62–70, 2019.

PAN, R.; MARTINEZ, A. S.; BRITO, T. S.; SEIDEL, E. P. Processes of Soil Infiltration and Water Retention and Strategies to Increase Their Capacity. **Journal of Experimental Agriculture International**, West Bengal, v. 20, n. 2, p. 1-14, 2018.

PELINSON, N. S.; DIAS, C. S.; CHAVES, S. S. F.; MULLER, F. C.; PEDROSO, R. M.; GONÇALVES, R. M.; ALBERTIN, R. M.; STEIN, R. T. **Morfologia e gênese do solo**. Porto Alegre: SAGAH, 2021.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002.

POLANÍA-HINCAPIÉ, K. L.; OLAYA-MONTES, A.; CHERUBIN, M. R.; HERRERA-VALENCIA, W.; ORTIZ-MOREA, F. A.; SILVA-OLAYA, A. M. Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 386, p. 1-10, 2021.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência Ambiental**, Alta Floresta, v. 27, p. 29-48, 2003.

ROCHA, R. S.; MONTEIRO, V. F.; ABREU, L. C. P. C.; FERNANDES, A. P. D.; SANTOS, C. R. C. Effects of the planting of legume species and soil conditions on the recovery of a sand and pebble mining área. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 32, p. 1695–1705, 2021.

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.;

OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Brazilian system of soil classification** (Sistema brasileiro de classificação de solos). Rio de Janeiro, Brazil: Embrapa Solos. 2018.

SANTOS, R. S.; WIESMEIER, M.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; LOCATELLI, J. L.; HOLZSCHUH, M.; CERRI, C. E. P. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, Amsterdam, v. 400, p. 1-14, 2021.

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Develop.**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SOIL SURVEY STAFF - KEYS TO SOIL TAXONOMY (12th edition), U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C. (2014)

SOUZA, J. F. D.; PERUSSO, R. L. S.; BONINI, C. S. B. ; SOUZA, C. T.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; PEDRO, F. G. Atributos físicos, matéria orgânica do solo e produção de Capim Marandu em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas** (UNICAMP), Campinas, v. 13, p. 51-64, 2019.

SOUSA, S. S.; FREITAS, D. A. F.; LATINI, A. O.; SILVA, B. M.; VIANA, J. H. M.; CAMPOS, M. P.; PEIXOTO, D. S.; BOTULA, Y. Iron ore mining areas and their reclamation in Minas Gerais State, Brazil: impacts on soil physical properties. **SN Applied Sciences**, Heidelberg, v. 2, p. 1-13, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa. 2017; 574p.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP. Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira - Área de Hidráulica e Irrigação. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

USHARANI, K. V.; ROOPASHREE, K. M.; DHANANJAY, N. Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, New Delhi, v. 8, n. 5, p. 1256-1267, 2019.

XINLIANG, W. Quantifying the contribution of phyllosilicate mineralogy to aggregate stability in the East Asian monsoon region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 393, p. 1-11, 2021.

YAMANISHI, J.; WASE, S.; ISHIDA, N.; FUJITA, D. Multivariate Analysis for Scanning Tunneling Spectroscopy Data. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 428, p. 186–190, 2018.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 61, p. 1024-1030, 1997.

III CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas, houve um notável avanço na recuperação de áreas degradadas, impulsionando um aumento significativo na produção científica internacional. Com o objetivo de recuperar os atributos físicos, químicos e biológicos das plantas dos solos afetados. Para atingir esse objetivo, vemos um constante aprimoramento das técnicas de recuperação, visando assegurar a estabilidade e sustentabilidade do ambiente para as gerações presentes e futuras.

O avanço da tecnologia e a expansão da pesquisa estão ampliando as possibilidades de recuperação de áreas degradadas, um desafio complexo. Além da perda de vegetação, elementos essenciais para a regeneração biótica, como o banco de sementes e plântulas, também são frequentemente comprometidos. Esse processo coloca em risco a conservação ambiental e a utilização sustentável dos recursos naturais, ressaltando a importância de respeitar o tempo necessário para a recuperação.

Com o passar do tempo, os tratamentos de recuperação demonstraram eficácia na melhoria da fertilidade do solo, com destaque para o tratamento com mucuna, que se mostrou o mais eficiente na recuperação de solos degradados. No entanto, uma nova intervenção antrópica é necessária para manter a recuperação dos atributos do solo.

Devido à eficácia dos tratamentos aplicados na área em recuperação, foi observada a ocorrência de dezesseis novas espécies nativas do cerrado, sendo que a espécie *Machaerium acutifolium* Vogel se adaptou de forma mais destacada. O desenvolvimento dessas espécies foi mais expressivo nas parcelas que receberam tratamentos com calcário e mucuna-preta, bem como calcário e guandu.

A análise dos tratamentos realizados até 1998 e após 2008 evidencia principalmente o impacto no aumento ou redução da macroporosidade e densidade do solo na camada superficial, ao longo dos anos estudados. Notavelmente, somente em 2023, esse efeito se estendeu para a camada de 0,20-0,40m. Os tratamentos avaliados não apresentaram diferenças significativas nos anos considerados, ressaltando a importância da adição de uma fonte de matéria orgânica.