

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JAIR AUGUSTO ZANON

RELAÇÕES DE FATORES EDÁFICOS, DA VEGETAÇÃO E DE MANEJO COM
ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO

CURITIBA

2023

JAIR AUGUSTO ZANON

RELAÇÕES DE FATORES EDÁFICOS, DA VEGETAÇÃO E DE MANEJO COM
ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração "Solo e Ambiente", Linha de Pesquisa "Propriedades e Processos Biogeoquímicos nos Ecossistemas", Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Renato Marques

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Zanon, Jair Augusto

Relações de fatores edáficos , da vegetação e de manejo com atributos microbiológicos do solo / Jair Augusto Zanon. – Curitiba, 2023.

1 recurso online: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Renato Marques

1. Solos - Composição. 2. Solos - Teor de nitrogênio. 3. Solos - Microbiologia. I. Marques, Renato. II. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **JAIR AUGUSTO ZANON** intitulada: **RELAÇÕES DE FATORES EDÁFICOS, DA VEGETAÇÃO E DE MANEJO COM ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO**, sob orientação do Prof. Dr. RENATO MARQUES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica
20/04/2023 08:52:25.0

RENATO MARQUES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
19/04/2023 12:26:56.0

EVERALDO DOS SANTOS
Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL DE EDUC., CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
21/04/2023 11:29:08.0

MAURO VALDIR SCHUMACHER
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

Assinatura Eletrônica
19/04/2023 12:27:34.0

FABIANE MACHADO VEZZANI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
19/04/2023 13:54:36.0

MARCOS VINICIUS WINCKLER CALDEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO)

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: pgcisolo@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 277295

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prrpg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 277295

Aos meus amigos, familiares e a minha noiva Andressa, grande inspiração e incentivadora deste percurso acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me dar forças e sabedoria nos momentos mais importantes, sem Ele não estaríamos aqui, nesta etapa essencial e tão significativa da vida.

Ao Professor Dr. Renato Marques pela amizade e ensinamentos, por todo auxílio e motivação no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Obrigado pelo apoio e a valiosa orientação, desde antes do início do doutorado. Ao longo destes quatro anos foram desenvolvidos projetos de pesquisa de relevante importância, que levarei como aprendizado por toda minha carreira profissional.

Ao IPEF e PPPIB, pela parceria e acompanhamento nas realizações das atividades a campo, bem como o apoio e a estrutura oferecida nas cidades de Lages, Caçador, Joaçaba e Campo Belo do Sul. Obrigado em especial as empresas parceiras (Gateados, Frameport, Irani e Klabin), por terem permitido que trabalhasse em suas terras, confiando e apoiando na realização deste trabalho.

Ao PPBio, pelo trabalho de coleta a campo e o fornecimento amostras de solo e inventários florestais, fundamentais para parte de dados utilizados nesta pesquisa.

Aos meus colegas do LAB, Janaina, Carolina, Diego, Anadia, Leonardo, Guilherme, Luis e Wilson, que me ajudaram em vários momentos nos trabalhos de campo e laboratório, obrigado pelas conversas e pelos momentos compartilhados.

Agradeço também a todos os amigos próximos (Gustavo, Ricardo, Ramon, Bruno, Kauê, Rabech, Hugo, Camila, Jacque e Júlia), que compartilharam poucos, porém especiais momentos ao longo desta trajetória.

A todos os professores e funcionários do DSEA, especialmente à Denise e às laboradoras Fabi, Carla, Heila, Josi e Maria, pelos ensinamentos e colaboração no desenvolvimento das análises.

A toda a minha família, por serem tão especiais e presentes em minha vida. Dedico esta tese aos meus avós Astésia e Antônio (*in memoriam*), pois, sempre foram inspiração e exemplos de vida.

À Andressa, pelo amor, companheirismo, compreensão, apoio e incentivo fundamentais para conclusão desta etapa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). “Código 001.”

Você não percebeu que você é o único representante do seu sonho na face da terra? Se isso não fizer você correr, eu não sei o que vai.

(Emicida)

RESUMO

Os atributos microbiológicos do solo são potenciais indicadores para a compreensão das relações solo-planta em ecossistemas nativos e plantações florestais comerciais, pois complementam os atributos químicos e físicos do solo. Fatores edáficos, da vegetação e de manejo influenciam a microbiologia do solo de diferentes formas; e estudar suas interrelações é fundamental para o entendimento da dinâmica de ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. A utilização dos atributos microbiológicos como indicadores de qualidade do solo tem obtido resultados satisfatórios devido à sensibilidade para prever os estresses que ocorrem nos ecossistemas, e isso varia de acordo com a classe do solo, cobertura vegetal e manejo aplicado. O objetivo geral foi avaliar as relações entre fatores edáficos, da vegetação e de manejo com os atributos microbiológicos do solo e a eficiência destes como indicadores de mudanças no sistema solo-planta. A tese foi composta por 3 capítulos; e as áreas de pesquisa são representadas por: (i) plantações de *Pinus taeda* L. com e sem fertilização aos 8 anos de idade, sobre Latossolos, Cambissolos e Neossolos, e coleta de solo aos 18 anos; (ii) plantações de *Pinus taeda* em crescimento inicial, com solo coletado aos 18 meses, em Latossolos, Nitossolos e Cambissolos; e (iii) ecossistemas terrestres expostos a vários graus de impactos antrópicos, em diferentes classes de solo, em áreas de Mata Atlântica e de Cerrado. Amostras de solo foram coletadas das camadas superficiais (0-5, 5-10 e 0-10 cm) e determinadas para as seguintes análises microbiológicas: ensaio de mineralização de nitrogênio (Nmin), carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO_2). Foram determinados os atributos químicos do solo: P e K (Mehlich I), Al, Ca e Mg (KCl), pH em $CaCl_2$, acidez potencial (H+Al), N e C (combustão total); e a análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro. Os dados de inventário florestal foram obtidos em colaboração com o Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB) e a Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem (SPVS). De maneira geral, os atributos microbiológicos Nmin, CBM e RBS se correlacionaram com as características do solo e da vegetação, com particularidades de acordo com cada plantação de *Pinus taeda* e a fitossociologia dos ecossistemas. A fertilização no *Pinus taeda* aos 8 anos mostrou efeito significativo nos atributos microbiológicos do solo; e os teores de fósforo e argila se correlacionaram positivamente com o Nmin e o CBM. Para o *Pinus taeda* em crescimento inicial, o CBM e a RBS mostraram estreita correlação com o teor de argila, pH, K e relação C/N; e os atributos microbiológicos se mostraram sensíveis em explicar o histórico de uso do solo. Nos ecossistemas de Mata Atlântica, CBM e RBS foram os atributos microbiológicos mais correlacionados com os fatores do solo e da vegetação. No Cerrado, os atributos microbiológicos Nmin, CBM, NBM e RBS foram bons indicadores de relações com a vegetação e com as características edáficas do solo. Os atributos microbiológicos apresentaram associação espacial direta com as tipologias vegetais em cada ecossistema e foram influenciados de maneira específica, conforme as características edafoclimáticas de cada ecossistema.

Palavras-chave: Mineralização do nitrogênio. Biomassa microbiana do solo. Cerrado. Mata Atlântica. Campos de Altitude. *Pinus taeda*.

ABSTRACT

Soil microbiological attributes are potential indicators for understanding soil-plant relationships in native ecosystems and commercial forest plantations, as they complement the soil's chemical and physical attributes. Edaphic, vegetation, and management factors influence soil microbiology in different ways; and studying their interrelationships is fundamental to understanding the dynamics of nutrient cycling in forest ecosystems. The use of microbiological attributes as indicators of soil quality has obtained satisfactory results due to the sensitivity to predict stresses that occur in ecosystems, and this varies according to the soil class, vegetation cover, and applied management. The general objective was to evaluate the relationships between edaphic, vegetation, and management factors with the microbiological attributes of the soil and their efficiency as indicators of changes in the soil-plant system. The thesis was composed of 3 chapters; and the research areas are represented by: (i) *Pinus taeda* L. plantations with and without fertilization at 8 years of age, on Oxisols, Cambisols, and Entisols, and soil collection at 18 years of age; (ii) *Pinus taeda* plantations in initial growth, with soil collected at 18 months, in Oxisols, Ultisols and Cambisols; and (iii) terrestrial ecosystems exposed to varying degrees of anthropogenic impacts, in different soil classes, in Atlantic Forest and Cerrado areas. Soil samples were collected from the surface layers (0-5, 5-10, and 0-10 cm) and determined for the following microbiological analyses: nitrogen mineralization assay (Nmin), microbial biomass carbon (CBM), biomass nitrogen microbial balance (NBM), basal soil respiration (RBS) and metabolic quotient (qCO_2). The chemical attributes of the soil were determined: P and K (Mehlich I), Al, Ca, and Mg (KCl), pH in $CaCl_2$, potential acidity (H+Al), N and C (total combustion); and particle size analysis was carried out using the densimeter method. Forest inventory data was obtained in collaboration with the Cooperative Program on Pine Research in Brazil (PPPIB) and the Wildlife Research Society (SPVS). In general, the microbiological attributes Nmin, CBM, and RBS correlated with the characteristics of the soil and vegetation, with particularities according to each *Pinus taeda* plantation and the phytosociology of the ecosystems. Fertilization in *Pinus taeda* at 8 years of age showed a significant effect on the microbiological attributes of the soil; phosphorus and clay contents were positively correlated with Nmin and CBM. For *Pinus taeda* in early growth, CBM and RBS showed a close correlation with clay content, pH, K, and C/N ratio; and microbiological attributes proved to be sensitive in explaining the history of land use. In Atlantic Forest ecosystems, CBM and RBS were the microbiological attributes most correlated with soil and vegetation factors. In the Cerrado, the microbiological attributes Nmin, CBM, NBM, and RBS were good indicators of relationships with vegetation and soil edaphic characteristics. The microbiological attributes showed a direct spatial association with the plant typologies in each ecosystem and were influenced in a specific way, according to the edaphoclimatic characteristics of each ecosystem.

Keywords: Nitrogen mineralization. Soil microbial biomass. Cerrado Biome. Atlantic forest. Mountain Grass Fields. *Pinus taeda*.

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ACP	- Análise de Componentes Principais
ANOVA	- Análise de Variância
BMS	- Biomassa Microbiana do Solo
CBM	- Carbono da Biomassa Microbiana
CO ₂	- Dióxido de Carbono
DA	- Densidade Absoluta
DoA	- Dominância Absoluta
FED	- Floresta Estacional Decidual
FOD	- Floresta Ombrófila Densa
FOM	- Floresta Ombrófila Mista
IPEF	- Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
ITTI	- Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura
MOS	- Matéria Orgânica do Solo
NMDS	- Escalonamento Multidimensional Não Métrico
NBM	- Nitrogênio da Biomassa Microbiana
Nmin	- Mineralização do Nitrogênio
N-NH ₄ ⁺	- Nitrogênio na forma de amônio
N-NO ₃ ⁻	- Nitrogênio na forma de nitrato
PNSJ	- Parque Nacional de São Joaquim
PPBio	- Programa de Pesquisa em Biodiversidade
PPPIB	- Programa Cooperativo sobre Pesquisa do <i>Pinus</i> no Brasil
qCO ₂	- Quociente Metabólico
RBS	- Respiração Basal do Solo
RNG	- Reserva Natural Guaricica
SPVS	- Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2	MATERIAL E MÉTODOS GERAL	17
2.1	ÁREAS DE ESTUDO E COLETAS DE SOLO.....	17
2.2	ENSAIO DE MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO DO SOLO	18
2.3	DETERMINAÇÃO DA RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO (RBS).....	19
2.4	DETERMINAÇÃO DO CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM) E NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA (NBM)	20
2.5	QUOCIENTE METABÓLICO (qCO_2).....	21
2.6	ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	22
2.7	DADOS DE VEGETAÇÃO.....	22
3	REFERÊNCIAS.....	22
4	CAPÍTULO I: RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS EDÁFICOS, QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO EM PLANTAÇÕES DE <i>Pinus taeda</i> L. AOS 18 ANOS DE IDADE.....	32
4.1	RESUMO.....	32
4.2	ABSTRACT	33
4.3	INTRODUÇÃO.....	34
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.4.1	Áreas de estudo.....	36
4.4.2	Amostragem de solos e análises laboratoriais	37
4.4.3	Análise estatística.....	39
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.5.1	Mineralização do nitrogênio.....	39
4.5.2	Carbono da biomassa microbiana	42
4.5.3	Respiração basal do solo e quociente metabólico.....	44
4.5.4	Relações entre os atributos microbiológicos, químicos e físicos do solo e o efeito da fertilização mineral.....	47
4.6	CONCLUSÕES.....	55
4.7	REFERÊNCIAS	55
5	CAPÍTULO II: RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM PLANTAÇÕES JOVENS DE <i>Pinus taeda</i>, SOBRE DIFERENTES CLASSES DE SOLO DO SUL DO BRASIL.....	66

5.1	RESUMO.....	66
5.2	ABSTRACT	67
5.3	INTRODUÇÃO.....	68
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	69
5.4.1	Área de estudo	69
5.4.2	Coleta e análises das amostras de solo	71
5.4.3	Análise estatística.....	71
5.5	RESULTADOS	71
5.5.1	Atributos químicos e físicos	71
5.5.2	Atributos microbiológicos do solo	72
5.5.3	Correlações entre os atributos do solo	76
5.6	DISCUSSÃO	78
5.6.1	Atributos físicos, químicos e microbiológicos	78
5.6.2	Relações entre os atributos do solo.....	81
5.7	CONCLUSÕES.....	82
5.8	REFERÊNCIAS	82
6	CAPÍTULO III: RELAÇÕES SOLO-PLANTA EM DIFERENTES ECOSSISTEMAS TERRESTRES COM FOCO NOS ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO.....	92
6.1	RESUMO	92
6.2	ABSTRACT	93
6.3	INTRODUÇÃO.....	94
6.4	MATERIAL E MÉTODOS	96
6.4.1	Áreas de Estudo	96
6.4.2	Coleta e caracterização física e química das amostras de solo	99
6.4.3	Dados de florística e fitossociologia.....	102
6.4.4	Análises estatísticas	103
6.5	RESULTADOS	104
6.5.1	Atributos microbiológicos do solo	104
6.5.1.1	Reserva Natural Guaricica.....	104
6.5.1.2	Parque Nacional de São Joaquim	109
6.5.1.3	Área de Cerrado	113
6.5.2	Relações dos atributos físicos e químicos do solo e da vegetação com os atributos microbiológicos nos ecossistemas.....	119

6.6	DISCUSSÃO	125
6.6.1	Mineralização do nitrogênio	125
6.6.2	Carbono da biomassa microbiana	127
6.6.3	Nitrogênio da biomassa microbiana.....	129
6.6.4	Respiração basal do solo	129
6.6.5	Quociente metabólico	130
6.6.6	Influência dos parâmetros químicos, físicos, e da vegetação com os atributos microbiológicos do solo	130
6.7	CONCLUSÕES.....	134
6.8	REFERÊNCIAS	134
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
8	REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE 1	174
APÊNDICE 2	174
APÊNDICE 3	175
APÊNDICE 4	176
APÊNDICE 5	176
APÊNDICE 6	178
APÊNDICE 7	179

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil existem cerca de 9,55 milhões de hectares de plantações florestais, formados principalmente por povoamentos florestais dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (IBÁ, 2021). A maior parte desses povoamentos florestais estão em ecossistemas originalmente pertencentes aos biomas de Mata Atlântica e de Cerrado (ESPÍNDOLA et al., 2020; LÓPEZ-POMA et al., 2020; THOMAZINI et al., 2015). No longo prazo, a sustentabilidade e a produção das plantações florestais podem sofrer impactos devido à baixa fertilidade, relacionada principalmente aos fatores de formação do solo (BÜNEMANN et al., 2018; LI et al., 2020); e à deficiência nutricional, em consequência da exportação de nutrientes pela colheita florestal (ANGST et al., 2018; MA et al., 2017). Os impactos causados pela substituição das florestas naturais por plantações florestais ainda não são conhecidos em sua totalidade (HOULE e MORE, 2019), e podem alterar a dinâmica dos nutrientes e a microbiologia do solo (GAUDIO et al., 2015; KAMEI et al., 2008; VELOSO et al., 2019).

A microbiologia do solo pode ser analisada por atributos microbiológicos, que são ferramentas utilizadas para o entendimento mais preciso das funções do solo, e complementam a avaliação dos indicadores químicos e físicos (SOARES et al., 2019; TANG et al., 2019). Para solos agrícolas e florestais, os atributos microbiológicos mais utilizados são: carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico (qCO_2) e ensaios de mineralização do nitrogênio (Nmin) (MEDEIROS et al., 2017; SILVA et al., 2018). Estes atributos são utilizados devido à praticidade das análises no laboratório e fácil interpretação de resultados (LIMA et al., 2013). Vários autores vêm utilizando as análises microbiológicas como indicadores da qualidade do solo, com resultados satisfatórios (ARAGÃO et al., 2020; AGNELO et al., 2020).

A biomassa e a atividade microbiológica são apontadas como bons indicadores da qualidade do solo (FINE et al., 2018). A atividade microbiológica pode resultar em efeitos positivos ou negativos na qualidade do solo conforme as características edafoclimáticas e o manejo florestal (MANIRAKIZA et al., 2019). O funcionamento microbiológico do solo em sistemas de florestas nativas ou plantadas foram estudados por diversos autores nos últimos tempos (LÓPEZ-POMA et al.,

2020; WU et al., 2017; ZHANG et al., 2018). A importância da atividade microbiana do solo se dá ao fato dos microrganismos serem responsáveis pela decomposição de diversos compostos orgânicos, além de reguladores da biogeoquímica dos nutrientes (FU et al., 2019; KUZYAKOV et al., 2019). Outros fatores, além do sistema de manejo, influenciam a microbiologia do solo, tais quais: classe de solo, temperatura, umidade, pH, fertilidade do solo, fauna do solo e a composição da vegetação (ROMEO et al., 2020; TRANNIN et al., 2007).

O manejo do solo exerce grande efeito na eficiência da população microbiana de um ecossistema (MGELWA et al., 2019). A mudança do manejo do solo em um ecossistema pode ser detectável rapidamente pela biomassa microbiana e outros atributos microbiológicos (KEYS et al., 2018; VIVANCO e AUSTIN 2019). Isso ocorre porque os metabólitos e os elementos como carbono (C) e nitrogênio (N) tem rápida ciclagem na matéria orgânica, principalmente na camada mais superficial do solo (CHENG et al., 2020; GAMA-RODRIGUES et al., 2008). A estimativa da biomassa microbiana do solo vem sendo utilizada como avaliação complementar de fluxos de carbono e nitrogênio (BOMFIM et al., 2020; GÖRANSSON et al., 2013), contribuindo para o estudo da ciclagem de nutrientes e produtividade vegetal, além de possuir relação direta com a quantidade de nutrientes imobilizados no solo (BROUILLARD et al., 2017; GAMA-RODRIGUES et al., 2005).

A participação dos microrganismos na decomposição da matéria orgânica do solo é a principal fonte superficial de CO₂ (SAWADA et al., 2017). Este processo é conhecido por respiração do solo e trata-se da liberação de carbono na forma de CO₂ em amostras de solo, onde a quantidade de C liberado serve como um indicador de carbono lábil ou do carbono prontamente metabolizável do solo (WOLOSZCZYK et al., 2020). Outra medida de atividade microbiana é o quociente metabólico, que expressa a quantidade de CO₂ liberada por uma unidade de biomassa microbiana (ARAGÃO et al., 2020).

Pesquisas avaliando atributos microbiológicos do solo foram realizadas em diferentes ecossistemas (NOVAK et al., 2018; SAGLIKER et al., 2018). López-Poma et al. (2020) avaliaram o efeito da mineralização do nitrogênio em áreas de Cerrado nativo, convertidas em plantações de eucalipto e pastagem. Enquanto Thomazini et al. (2015) avaliaram o efeito do carbono da biomassa microbiana e da respiração do solo e relacionaram com umidade, temperatura e emissão de CO₂ em solos da Mata Atlântica. Ambos os autores relataram que o efeito do manejo florestal, quando

realizado respeitando as condições naturais, afetou de forma positiva os atributos microbiológicos e, conseqüentemente, a qualidade do solo nestes ecossistemas. Geralmente, sistemas florestais compostos com espécies nativas, tendem a maiores valores nos atributos microbiológicos em relação aos povoamentos de plantações florestais (SOUZA et al., 2021), resultando em altas taxas de sequestro de carbono, devido ao armazenamento de C pela atividade dos microrganismos do solo (LIMA et al., 2013; NANNIPIERI et al., 2017).

Estudos que relacionaram os atributos microbiológicos com os atributos químicos e físicos do solo, são realizados com o objetivo de compreender melhor a dinâmica de nutrientes no solo (NOOJIPADY et al., 2017; ZHAO e LI, 2018). Portanto, investigar os atributos microbiológicos dos ecossistemas colabora para o entendimento da qualidade do solo em diferentes formações florestais (NÓBREGA et al., 2018). Fatores edáficos como textura, estrutura e fertilidade do solo interferem na mineralização do nitrogênio (GONÇALVES et al., 2001). Neste sentido, experimentos com incubação do solo são realizados com o propósito de investigar o processo de mineralização de nitrogênio nos ecossistemas, e compreender o ciclo deste nutriente para minimizar impactos ambientais (KHIARI et al., 2019).

Alguns pesquisadores observaram que a fertilização mineral nitrogenada não tem gerado respostas satisfatórias nas plantações florestais (MANIRAKIZA et al., 2019; MOSCATELLI et al., 2008). Isso ocorre porque a mineralização do nitrogênio orgânico pode estar atuando durante o ciclo florestal, sendo suficiente para suprir a demanda florestal e tornando a fertilização nitrogenada desnecessária (HAGEMANN et al., 2017; JOSEPH et al., 2017). Manirakiza et al. (2019) avaliaram a mineralização do nitrogênio e também o C e N da biomassa microbiana em plantações com aplicação de fertilizante mineral; e identificaram que a fertilização estava aumentando a relação C/N a níveis adequados para a mineralização, inclusive melhorando a retenção de nitrato no solo, além de aumentar a matéria orgânica do solo e a biomassa microbiana. A relação C/N é importante no controle da taxa de mineralização (JOSEPH et al., 2017); e nas relações com diversos grupos de microrganismos (KUZYAKOV et al., 2019; LI et al., 2018; ZHANG et al., 2018).

Os atributos microbiológicos do solo apresentam alta sensibilidade para detectar mudanças e alterações no sistema solo-planta (ZHANG e MARSCHNER, 2017); e os efeitos do manejo do solo, fatores edáficos e a composição da

vegetação influenciam diretamente no fluxo de nutrientes, através da biomassa microbiana do solo (NOVAIR et al., 2020). Portanto, a avaliação dos atributos microbiológicos se presta para identificar tendências de mudanças na qualidade do solo e orientar as decisões de manejo e uso do solo devido a sua influência em diversos fatores edafoclimáticos (SUN et al., 2020; YEMADJE et al., 2017).

O presente estudo tem como objetivo investigar as relações entre fatores de natureza edáfica, da vegetação e de manejo do solo com os atributos microbiológicos e a eficiência destes como indicadores de mudanças no sistema solo-planta. Espera-se contribuir na identificação de atributos microbiológicos do solo que são influenciados por esses fatores; e quais podem ser eficientes como indicadores da qualidade do solo em plantações florestais e ecossistemas nativos. Este estudo foi dividido em três capítulos:

1. Relações entre atributos edáficos, químicos e microbiológicos do solo em plantações de *Pinus taeda* aos 18 anos de idade;
2. Relações entre atributos microbiológicos, físicos e químicos do solo em plantações jovens de *Pinus taeda*, sobre diferentes classes de solo do sul do Brasil;
3. Relações solo-planta em diferentes ecossistemas terrestres com foco nos atributos microbiológicos do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS GERAL

2.1 ÁREAS DE ESTUDO E COLETAS DE SOLO

As amostras de solo foram coletadas em plantações de *Pinus taeda* e áreas de vegetação com espécies nativas, em diferentes classes de solo e formações florestais. Os solos dos capítulos 1 e 2 foram coletados em experimentos do Programa Cooperativo sobre Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil (PPPIB) nos estados de Santa Catarina e Paraná. No capítulo 1, as amostras de solo são oriundas de solos de plantações florestais de *Pinus taeda*, com cerca de 18 anos de idade, que receberam tratamentos com e sem fertilização quando tinham 8 anos. No capítulo 2, as amostras de solos são de plantações jovens de *Pinus taeda* em experimentos com omissão e adição de nutrientes, com as coletadas de solo aos 2 anos de idade. As amostras de solo do capítulo 3, foram coletadas nos estados do

Paraná, Santa Catarina e Bahia, nos biomas Mata Atlântica e Cerrado, nas seguintes tipologias: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Campos de Altitude, Savana Arborizada e Floresta Estacional Decidual. São amostras oriundas de projetos de pesquisa em parceria com a Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental (SPVS) no Paraná; com o Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio) no Paraná e Santa Catarina; e com o Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI) na Bahia.

Para análise dos atributos microbiológicos do solo, foram utilizadas amostras de solo seco das camadas superficiais (0-5, 5-10 e 0-10 cm de profundidade) peneiradas em malha de 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA). Para os procedimentos analíticos as amostras foram reumedecidas até atingir a máxima capacidade de campo de acordo com cada classe de solo. O processo de análise dos atributos microbiológicos do solo foi feito com amostras em duplicata, sendo uma amostra para determinação da umidade do solo relativa à sua capacidade de campo; e a outra amostra utilizada no processo analítico para cada atributo microbiológico do solo.

2.2 ENSAIO DE MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO DO SOLO

O ensaio de mineralização de nitrogênio do solo sob condições anaeróbicas foi realizado pelo método descrito por Waring e Bremner (1964), com algumas adaptações. Cada amostra reumedecida foi colocada em tubo de centrifuga com 30 mL de solução extratora de KCl 2 mol L⁻¹, agitada por 45 minutos e centrifugada por 10 minutos na velocidade de 2000 rpm. Em seguida, as amostras foram submetidas à filtração rápida, sendo os filtros previamente umedecidos com 20 mL de KCl 2 mol L⁻¹ e lavadas imediatamente com água deionizada. Este processo visa eliminar possíveis resíduos de amônio que podem contaminar as amostras. Os filtros utilizados foram papéis de filtro quantitativo faixa preta com retenção nominal de 20 a 25 micra.

A primeira extração foi realizada antes da incubação e então, a partir desse ponto, foram feitas as incubações anaeróbicas das amostras de solo, usando metodologia adaptada de Gonçalves et al. (2001). O tempo de incubação teve a duração total de 75 dias, totalizando seis extrações do solo incubado. Durante a incubação, sob temperatura de 30°C, os solos dentro dos tubos permaneceram

imersos em 30 mL de solução nutritiva contendo Na_3PO_4 ($0,005 \text{ mol L}^{-1}$), MgSO_4 ($0,002 \text{ mol L}^{-1}$) e CaCl_2 ($0,005 \text{ mol L}^{-1}$) por períodos de 15 dias, sendo que a cada 15 dias o processo era reiniciado, realizando uma nova extração com KCl para extrair o nitrogênio inorgânico (N-NH_4^+ e N-NO_3^-).

O nitrato solúvel nas amostras filtradas foi determinado por espectrofotometria de absorção ultravioleta com redução química (NORMAN e STUCKI, 1981; HEINZMANN et al. 1984). Para tanto, foi diluído 1 mL do extrato em 0,2 mL de H_2SO_4 em um frasco de vidro, então completado com água deionizada para atingir o volume de 5 mL. A leitura foi realizada a 210 nm em espectrofotômetro Shimadzu UV Mini 1240. Em duplicata da amostra, foram adicionados 0,1 g de zinco metálico para a redução do nitrato, o que permite a leitura dos interferentes. Após 24 horas de reação, a leitura foi realizada em ambas as duplicatas. A diferença dos valores de leitura nas amostras, com e sem zinco metálico, expressa o teor de nitrato na solução extratora.

Para determinação do amônio solúvel, usou-se a metodologia do fenato (APHA, 1995). Do extrato obtido na extração com KCL, foi pipetado 1 mL ao qual foram adicionados 0,2 mL de solução alcoólica de fenol, 0,2 mL de solução de nitroprussiato sódico e 0,5 mL de solução oxidante, sendo então completado o volume das amostras para 5 mL com água deionizada em frascos de vidro. Em seguida as amostras foram submetidas à leitura no espectrofotômetro Shimadzu UV Mini 1240, em comprimento de onda de 640 nm.

2.3 DETERMINAÇÃO DA RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO (RBS)

A RBS foi feita conforme a metodologia descrita por Jenkison e Powlson (1976), a qual se baseia no princípio da quantificação do CO_2 emitido pelas amostras de solo e retido em hidróxido de sódio (NaOH).

Foram pesados 20 g de solo reumedecidos em potes de 600 mL; em seguida, adicionado um recipiente contendo 10 mL de NaOH 1 mol L^{-1} e um tubo de ensaio contendo 10 mL de água deionizada, para manter a umidade das amostras durante o período de incubação. Os potes foram fechados hermeticamente para que não tivesse entrada ou fuga de CO_2 do frasco de incubação. No procedimento, foram preparados seis frascos controles (branco), contendo apenas a solução de NaOH e

água deionizada para utilização no cálculo final. As amostras foram incubadas à temperatura constante de 25°C por 10 dias.

Após o período de incubação, os frascos com NaOH foram retirados da incubadora e, imediatamente foram adicionados 2 mL de BaCl₂, para completar a precipitação do CO₂. Em seguida, foi realizada a titulação com solução de HCl 0,5 mol L⁻¹, utilizando-se como indicador uma solução de fenolftaleína 1%. Foram realizadas a padronização das soluções para determinar as concentrações mais próximas do valor real.

O cálculo da RBS é representado pela seguinte equação:

$$RBS = \frac{(Vb - Va) \cdot M \cdot 6.1000}{Ps \cdot T}$$

Onde RBS = carbono da respiração basal do solo; Vb (mL) = volume do ácido clorídrico gasto na titulação da amostra em branco; Va (mL) = volume do ácido clorídrico gasto na titulação da amostra; M = molaridade exata do HCl; Ps (g) = massa de solo seco e T = tempo de incubação da amostra em horas.

2.4 DETERMINAÇÃO DO CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM) E NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA (NBM)

A determinação do CBM e do NBM foi realizada por irradiação em micro-ondas com amostras irradiadas e não-irradiadas. Para estimar o C e o N microbiano do solo, o método da irradiação-extração é bem padronizado e um dos mais utilizados para avaliar a biomassa microbiana do solo (LIU et al., 2018); considerado por vários autores como o método mais adequado para estimar C e N microbiano no solo em diferentes sistemas de manejo e uso do solo (CONRADS et al., 2018; FERREIRA et al., 1999).

Para cada amostra foram pesadas duas alíquotas de 20 g de solo reumedecido. Uma das alíquotas foi irradiada em forno micro-ondas da marca Philco, modelo PMS38NP, tensão de alimentação 127 V (60 Hz), frequência de micro-ondas de 2.450 MHz e concentração de energia 1,40 kW, durante 120 segundos. Após o procedimento de irradiação, foram adicionados a todos os frascos

25 mL de K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (VANCE et al., 1987), e agitados por 30 minutos em agitador orbital a 220 rpm. Após a decantação do solo foi retirado o sobrenadante passando-o em filtro de papel de filtração lenta acoplado a um funil e frasco para acondicionar as soluções.

Carbono e o nitrogênio extraídos com K_2SO_4 foram determinados em Analisador Elementar vario TOC cube. Para calcular o carbono da biomassa microbiana do solo foi realizado o cálculo da diferença da amostra irradiada e o carbono presente na amostra não irradiada, utilizando o fator de correção 0,33 (FERREIRA et al., 1999), representados na seguinte equação:

$$CBM = \frac{(CFI - CNFI)}{Kc = mg \text{ C Kg}^{-1} \text{ de solo}}$$

Onde CBM = carbono presente na biomassa microbiana do solo; CFI = carbono presente na amostra irradiada; CNFI = carbono presente na amostra não irradiada; Kc = fator de correção.

O cálculo do NBM do solo foi realizado pela diferença entre a quantidade de nitrogênio total recuperado no extrato da amostra irradiada e o recuperado da amostra não irradiada, utilizando o fator de correção de 0,54 (DE-POLLI e GUERRA, 2008), representados na seguinte equação:

$$NBM(mg \text{ Kg}^{-1}) = FNT \cdot KN^{-1}$$

Onde NBM = nitrogênio presente na biomassa microbiana do solo; FNT= diferença entre quantidades de N obtidas nas amostras irradiada e não irradiada; kN= fator de correção.

2.5 QUOCIENTE METABÓLICO (qCO_2)

O quociente metabólico foi calculado pela razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo. Onde o cálculo do qCO_2 da respiração basal do solo é:

$$qCO_2 = RBS \frac{(mg\ C_CO_2.Kg^{-1}\ solo\ h^{-1})}{CBM\ (mg\ C.Kg^{-1}\ solo)\ 10^{-3}}$$

Onde, qCO_2 (quociente metabólico); CBM (concentração de carbono da biomassa) e RBS (respiração basal).

2.6 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

As amostras de solo das profundidades 0-5; 5-10; 0-10 e 10-20 cm, foram submetidas às análises de rotina de fertilidade, com determinação do pH em $CaCl_2$, pH SMP, H+Al (estimado a partir do pH SMP), P e K extraídos com solução Mehlich I, Ca, Mg e Al trocáveis pelo extrator KCl 1 mol L⁻¹, sendo as determinações em fotômetro de chama (K), em espectrofotômetro de absorção atômica (Ca e Mg), por titulometria (Al) e colorimetria (P), conforme Marques e Motta (2003). C e N foram determinados por combustão total no Analisador Elementar Vario El III.

2.7 DADOS DE VEGETAÇÃO

Os dados dendrométricos de plantações de *Pinus taeda* foram fornecidos pelo Programa Cooperativo sobre Pesquisa do *Pinus* no Brasil (PPPIB), sendo a coleta dos dados realizada junto aos experimentos nas empresas parceiras que integram o PPPIB. No capítulo I foram utilizados dados de inventários anuais do *Pinus taeda*, ou seja, incremento médio anual (IMA); e no capítulo II foram utilizados dados de medições iniciais do *Pinus taeda*, altura (H) e diâmetro à altura do peito (DAP). Para o capítulo III, os dados da vegetação foram obtidos dos trabalhos de pesquisa de TREML (2021) e BIANCHIN (2017), sendo utilizados os parâmetros fitossociológicos: densidade absoluta (DA), dominância absoluta (DoA) e o valor de importância das espécies florestais (VI).

3 REFERÊNCIAS

AGNELO, L.; LEONEL, L. P.; SILVA, N. B.; CANDELLO, F. P.; SCHNEIDER, J.; TONETTI, A. L. Effects of wastewater disinfectants on the soil: Implications for soil

microbial and chemical attributes. **Science of The Total Environment**, v. 706, n. 1, p. 136007, 2020.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington: APHA, 1995.

ANGST, G.; MESSINGER, J.; GREINER, M.; HÄUSLER, W.; HERTEL, D.; KIRFEL, K.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEUSCHNER, C.; RETHEMEYER, J.; MUELLER, C. W. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 122, n. 1, p. 19-30, 2018.

ARAGÃO, O. B. S.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; CAPUTO, P. S. C.; RUFINI, M.; CARVALHO, G. R.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, F. M. S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, n. 1, p. 106205, 2020.

BIANCHIN, J. E. **Dinâmica da serapilheira e atributos microbiológicos do solo em um gradiente altitudinal de Floresta atlântica**. 168 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BOMFIM, B.; SILVA, L. C. R.; PEREIRA, R. S.; GATTO, A.; EMMERT, F.; HIGUCHI, N. Litter and soil biogeochemical parameters as indicators of sustainable logging in Central Amazonia. **Science of the Total Environment**, v. 714, n. 1, p. 136780, 2020.

BROUILLARD, B. M.; MIKKELSON, K. M.; BOKMAN, C. M.; BERRYMAN, E. M.; SHARP, J. O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 114, n. 1, p. 309-318, 2017.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.;

SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. 1, p. 105-125, 2018.

CHENG, Y.; WANG, J.; WANG, J.; WANG, S.; CHANG, S. X.; CAI, Z.; ZHANG, J.; NIU, S.; HU, S. Nitrogen deposition differentially affects soil gross nitrogen transformations in organic and mineral horizons. **Earth-Science Reviews**, v. 201, n. 1, p. 103033, 2020.

CONRADS, H.; INGWERSEN, J.; JU, X.; STRECK, T. Direct Measurement of CO₂ Retention in Arable Soils with pH Above 6.5 During Barometric Process Separation Incubation. **Pedosphere**, v. 28, n. 5, p. 726-738, 2018.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. Carbono, nitrogênio e fósforo na biomassa microbiana do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica - Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 500-502.

ESPÍNDOLA, S. P.; BOBUL'SKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Impact of nitrogen additions on soil microbial respiration and temperature sensitivity in native and agricultural ecosystems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Biology**, v. 75, n. 1, p. 120-127, 2018.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro-ondas para avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 991-996, 1999.

FINE, A. K.; SCHMIDT, M. P.; MARTÍNEZ, C. E. Nitrogen-rich compounds constitute an increasing proportion of organic matter with depth in Oi-Oe-Oa-A horizons of temperate forests. **Geoderma**, v. 323, n. 1, p. 1-12, 2018.

FU, Q.; YAN, J.; LI, H.; LI, T.; HOU, R.; LIU, D.; JI, Y. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles. **Geoderma**, v. 353, n. 1, p. 459-467, 2019.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; SANTOS, G. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, n. 1, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; VIANA, A. P. SANTOS, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1489-1499, 2008.

GAUDIO, N.; BELYAZID, S.; GENDRE, X.; MANSAT, A.; NICOLAS, M.; RIZZETTO, S.; SVERDRUO, H.; PROBST, A. Combined effect of atmospheric nitrogen deposition and climate change on temperate forest soil biogeochemistry: A modelling approach. **Ecological Modelling**, v. 306, n. 1. p. 24-34, 2015.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 601-616, 2001.

GÖRANSSON, H.; GODBOLD, D. L.; JONES, D. L.; ROUSK, J. Bacterial growth and respiration responses upon rewetting dry forest soils: impact of drought-legacy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, n. 1, p. 477-486, 2013.

HAGEMANN, N.; KAMMANN, C. I.; SCHMIDT, H. P.; KAPPLER, A.; BEHRENS, S. Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. **Plos One**, v. 11, n. 1, p. 171214, 2017.

HEINZMANN, F. X.; MIYAZAVA, M.; PAVAN, M. A. Determinação de nitrato por espectrofotometria de absorção ultravioleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, n. 1, p. 159-163, 1984.

HOULE, D.; MOORE, J. D. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to 8 years of ammonium-nitrate additions in two boreal forests of Quebec, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 437, n. 1, p. 263-271, 2019.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2019**. Brasília, 2020 em: <<https://IBÁ.org/datafiles/publicacoes/relatorios/IBÁ-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. Method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 1, p. 209-213, 1976.

JOSEPH, C. A.; KHIARI, L.; GALLICHAND, J.; BOUSLAMA, S. Classification and assessment models of first year byproducts nitrogen plant-availability from literature data. **Science of the Total Environment**, v. 586, n. 1, p. 976-984, 2017.

KAMEI, J.; PANDEY, H. N.; BARIK, S. K. Tree species distribution and its impact on soil properties, and nitrogen and phosphorus mineralization in a humid subtropical forest ecosystem of northeastern India. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, n. 1, p. 36-37, 2008.

KEYS, K.; BURTON, D. L.; PRICE, G. W.; DUINKER, P. N. Forest floor chemistry and mineral soil ion exposure after surface application of alkaline-treated biosolids under two white spruce (*Picea glauca*) plantations in Nova Scotia, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. 1, p. 208-221, 2018.

KHIARI, Z.; KALUTHOTA, S.; SAVIDOV, N. Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. **Aquaculture**, v. 500, n. 1, p. 492-499, 2019.

KUZYAKOV, Y.; HORWATH, W. R.; DORODNIKOV, M.; BLAGODATSKAYA, E. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 128, n. 1, p. 66-78, 2019.

LI, D.; LIU, J.; CHEN, H.; ZHENG, L.; WANG, K. Soil gross nitrogen transformations in responses to land use conversion in a subtropical karst region. **Journal of Environmental Management**, v. 212, n. 1, p. 1-7, 2018.

LI, J.; NIE, M.; PENDALL, E. Soil physico-chemical properties are more important than microbial diversity and enzyme activity in controlling carbon and nitrogen stocks near Sydney, Australia. **Geoderma**, v. 366, n. 1, p. 114-201, 2020.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOED, W. B.; GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, n. 1, p. 194-200, 2013.

LIU, Y.; ZHANG, J.; YANG, W.; WU, F.; XU, Z.; TAN, B.; ZHANG, L.; HE, X.; GUO, L. Canopy gaps accelerate soil organic carbon retention by soil microbial biomass in the organic horizon in a subalpine fir forest. **Applied Soil Ecology**, v. 125, n. 1, p. 169-176, 2018.

LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R.; BRITO, G. S.; BAUTISTA, S. Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and *Eucalyptus* plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 1, p. 135397, 2020.

MA, F.; JIA, X.; ZHOU, W.; ZHOU, L.; YU, D.; MENG, Y.; DAI, L. Soil nitrogen mineralization in a wind-disturbed area on Changbai Mountain after 30 years of vegetation restoration. **Acta Ecologica Sinica**, v. 37, n. 1, p. 265-271, 2017.

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LUCE, M. S.; HAMEL, C.; ANTOUN, H.; KARAM, A. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids. **Applied Soil Ecology**, v. 142, n. 1, p. 90-98, 2019.

MARQUES, R.; MOTTA, A. C. V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, M. R. (Org.) **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. Curitiba, UFPR, 2003. p.81-102.

MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R.; LIMA, J. R. S.; ALMEIDA-CÔRTEZ, J. S.; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; COURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, v. 151, n. 1, p. 137-146, 2017.

MGELWA, A. S.; HU, Y. L.; XU, W. B.; GE, Z. Q.; YU, T. W. Soil carbon and nitrogen availability are key determinants of soil microbial biomass and respiration in forests along urbanized rivers of southern China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 43, n. 1, p. 126351, 2019.

MOSCATELLI, M. C.; DE ANGELIS, P.; LAGOMARSINO, A.; GREGO, S. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. **Forest Ecology Management**, v. 255, p.447-454, 2008.

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 12-26, 2017.

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; HUGHES, H. J.; JUNGKUNST, H. F.; GEROLD, G. Impacts of land-use and land-cover change on stream hydrochemistry in the Cerrado and Amazon biomes. **Science of the Total Environment**, v. 635, n. 1, p. 259-274, 2018.

NOOJIPADY, P.; MORTON, D.; MACEDO, M.; VICTÓRIA, D.; HUANG, C.; GIBBS, H.; BOLFE, E. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 025004, 2017.

NORMAN, R. J.; STUCKI, J. W. The determination of nitrate and nitrite in soil extracts by ultraviolet spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 347-353, 1981.

NOVAIR, S. B.; HOSSEINI, H. M.; ETESAMI, H.; RAZAVIPOUR, T. Rice straw and composted azolla alter carbon and nitrogen mineralization and microbial activity of a

paddy soil under drying–rewetting cycles. **Applied Soil Ecology**, v. 154, n. 1, p. 103638, 2020.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; BRUMATTI, A. V.; SANTOS, L. L.; SALES, L. C. Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal**, v. 41, n. 3, p. 603-611, 2018.

ROMEO, F.; SETTINERI, G.; SIDARI, M.; MALLAMACI, C.; MUSCOLO, A. Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. **Forest Ecology and Management**, v. 465, n. 1, p. 118106, 2020.

SAGLIKER, H. A.; CENKSEVEN, S.; KIZILDAG, N.; KOCAK, B.; OZDENIZ, E.; OZBEY, B. G.; BÖLÜKBASI, A.; KURT, L. Is parent material an important factor in soil carbon and nitrogen mineralization? **European Journal of Soil Biology**, v. 89, n. 1, p. 45-50, 2018.

SAWADA, K.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T. Effect of repeated drying–rewetting cycles on microbial biomass carbon in soils with different climatic histories. **Applied Soil Ecology**, v. 120, n. 1, p. 1-7, 2017.

SILVA, A. O.; COSTA, A. M.; TEIXEIRA, A. F. S.; GUIMARÃES, A. A.; SANTOS, J. V.; MOREIRA, F. M. S. Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysionomies. **Ecological Indicators**, v. 93, n. 1, p. 142-151, 2018.

SOARES, D. S.; RAMOS, M. L. G.; MARCHÃO, R. L.; MACIEL, G. A.; OLIVEIRA, A. D.; MALAQUIAS, J. V.; CARVALHO, A. M. How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 1, p. 104316, 2019.

SOUZA, A. G. V.; SILVA, G. G.; BESERRA, G. A.; SOUZA, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, V. D.; ROCHA FILHO, C. T.; SERAFIM, M. N.; SANTOS, L. C. S.;

SANTOS, T. E. B.; VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3673, 2021.

SUN, Y.; HE, Z.; WU, Q.; ZHENG, J.; LI, Y.; WANG, Y.; CHEN, T.; CHI, D. Zeolite amendment enhances rice production, nitrogen accumulation and translocation in wetting and drying irrigation paddy field. **Agricultural Water Management**, v. 235, n. 1, p. 106126, 2020.

TANG, J.; ZHANG, J.; REN, L.; ZHOU, Y.; GAO, J.; LUO, L.; YANG, Y.; PENG, Q.; HUANG, H.; CHEN, A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 242, n. 1, p. 121-130, 2019.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, E. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2015.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biossólido industrial e cultivo de milho. **Revista Brasileira de Solo**, v. 31, n. 1, p. 1173-1184, 2007.

TREML, L. M. **Vegetação e solo: estudo de caso em uma área de transição entre fisionomias no bioma Cerrado**. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 1, p. 703-707, 1987.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, n. 1, p. 139-146, 2019.

VIVANCO, L.; AUSTIN, A. T. The importance of macro- and micro-nutrients over climate for leaf litter decomposition and nutrient release in Patagonian temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 441, n. 1, p. 144-154, 2019.

WARING, S. A.; BREMNER, J. M. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. **Nature**, v. 201, n. 1, p. 951-952, 1964.

WOLOSZCZYK, P.; FIENCKE, C.; ELSNER, D. C.; CORDSEN, E.; PFEIFFER, E. M. Spatial and temporal patterns in soil organic carbon, microbial biomass and activity under different land-use types in a long-term soil-monitoring network. *Pedobiologia*. **Journal of Soil Ecology**, v. 80, n. 1, p. 150642, 2020.

WU, K.; CHEN, D.; TU, C.; QIU, Y.; BURKEY, K. O.; REBERG-HORTON, S. C.; PENG, S.; HU, S. CO₂-induced alterations in plant nitrate utilization and root exudation stimulate N₂O emissions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 106, n. 1, p. 9-17, 2017.

YEMADJE, P. L.; CHEVALLIER, T.; GUIBERT, H.; BERTRAND, I.; BERNOUX, M. Wetting-drying cycles do not increase organic carbon and nitrogen mineralization in soils with straw amendment. **Geoderma**, v. 304, n. 1, p. 68-75, 2017.

ZHANG, M.; WANG, W.; WANG, D.; HEENAN, M.; XU, Z. Short-term responses of soil nitrogen mineralization, nitrification and denitrification to prescribed burning in a suburban forest ecosystem of subtropical Australia. **Science of the Total Environment**, v. 642, n. 1, p. 879-886, 2018.

ZHANG, Y.; MARSCHNER, P. Residue addition combined with rewetting of dry soil – Effect of timing of residue addition on soil respiration, microbial biomass, nutrient availability and legacy effect. **Geoderma**, v. 299, n. 1, p. 83-90, 2017.

ZHAO, N.; LI, X. G. Effects of aspect–vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. **Catena**, v. 155, n. 1, p. 1-9, 2017.

4 CAPÍTULO I: RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS EDÁFICOS, QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS DO SOLO EM PLANTAÇÕES DE *Pinus taeda* L. AOS 18 ANOS DE IDADE

4.1 RESUMO

O Brasil se destaca no setor de produção florestal de produtos madeireiros e não madeireiros e, geralmente, as plantações florestais estão em áreas com baixa fertilidade natural. O manejo adequado com práticas de correção de acidez e fertilização do solo são importantes para a produtividade das espécies plantadas. *Pinus taeda* é uma das principais espécies florestais utilizadas para fins comerciais; e na região sul do Brasil se encontram os maiores cultivos desta espécie, com destaque para os estados do Paraná e Santa Catarina. *Pinus taeda* possui potencial para aumento de produtividade e sustentabilidade quando adotadas boas práticas de manejo, com aplicações corretas de fertilizantes com base nas análises de solo. Os atributos microbiológicos do solo ainda são ferramentas pouco utilizadas nas análises de solo em áreas com plantações florestais, e sua utilização tende a melhorar o entendimento das respostas do *Pinus taeda* à fertilização, com potencial para contribuir na manutenção dos ciclos florestais desta espécie, sem esgotar os nutrientes do solo. Estudos buscando relacionar os atributos microbiológicos e químicos com os demais atributos edáficos podem contribuir para explicar melhor o efeito da fertilização mineral, tornando-se mais uma ferramenta para explicar a qualidade do solo nas plantações de *Pinus taeda*. O presente estudo tem por objetivo relacionar alguns atributos edáficos com os atributos químicos e microbiológicos do solo de sítios de *Pinus taeda* com 18 anos de idade instalados no sul do Brasil, os quais foram submetidos ou não à fertilização mineral aos 8 anos de idade. As determinações analíticas nas amostras superficiais de solo foram: mineralização do nitrogênio (N_{min}), respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBM) e quociente metabólico (qCO_2); além das análises de rotina para fertilidade e granulometria do solo. Os atributos microbiológicos do solo se mostraram viáveis para explicar a fertilização do *Pinus taeda*, e os atributos com maiores correlações com outros atributos químicos e físicos do solo foram o N_{min} e o CBM. Carbono, nitrogênio, fósforo e o teor de argila foram os atributos que tiveram relação direta com a qualidade da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, com a atividade microbiológica nos sítios de *Pinus taeda*. De maneira geral, os sítios de *Pinus taeda* de Santa Catarina apresentaram os maiores valores de atributos microbiológicos do solo, em comparação aos sítios do Paraná, devido aos atributos edáficos mais favoráveis à biota do solo. O efeito da fertilização foi identificado nos sítios de Santa Catarina, atuando positivamente na microbiologia do solo.

Palavras-chave: Atividade microbiológica no solo. Matéria orgânica. Manejo florestal. Fertilização em meia-rotação.

4.2 ABSTRACT

Brazil stands out in the forest production sector of wood and non-wood products and, generally, forest plantations are in areas with low natural fertility. Proper management with acidity correction practices and soil fertilization are important for the productivity of planted species. *Pinus taeda* is one of the main forest species used for commercial purposes; and the largest cultivation of this species is found in the southern region of Brazil, with emphasis on the states of Paraná and Santa Catarina. *Pinus taeda* has the potential to increase productivity and sustainability when good management practices are adopted, with correct fertilizer applications based on soil analysis. The microbiological attributes of the soil are still little-used tools in soil analyses in areas with forest plantations, and their use tends to improve the understanding of the responses of *Pinus taeda* to fertilization, with the potential to contribute to the maintenance of the forest cycles of this species, without depleting soil nutrients. Studies seeking to relate microbiological and chemical attributes with other soil attributes can contribute to better explaining the effect of mineral fertilization, becoming another tool to explain soil quality in *Pinus taeda* plantations. The present study aims to relate some edaphic attributes with the chemical and microbiological attributes of the soil of 18-year-old *Pinus taeda* sites installed in southern Brazil, which were subjected or not to mineral fertilization at 8 years of age. The analytical determinations in surface soil samples were: nitrogen mineralization (Nmin), basal soil respiration (RBS), microbial biomass carbon (CBM), and metabolic quotient (qCO_2); in addition to routine analyses for soil fertility and granulometry. The microbiological attributes of the soil proved to be viable to explain the fertilization of *Pinus taeda*, and the attributes with the highest correlations with other chemical and physical attributes of the soil were Nmin and CBM. Carbon, nitrogen, phosphorus, and clay content were the attributes that had a direct relationship with the quality of soil organic matter and, consequently, with microbiological activity in *Pinus taeda* sites. In general, the *Pinus taeda* sites in Santa Catarina presented the highest values of microbiological soil attributes, compared to the sites in Paraná, due to the edaphic attributes that are more favorable to the soil biota. The effect of fertilization was identified on sites in Santa Catarina, acting positively on soil microbiology.

Keywords: Soil microbial activity. Soil organic matter. Mid-rotation fertilization. Forest management

4.3 INTRODUÇÃO

As plantações florestais são de grande importância na economia internacional, diversos produtos madeireiros e não madeireiros são processados a partir da extração planejada de espécies florestais (BROCK et al., 2019). No Brasil, são importantes, por evitar que as florestas nativas sofram exploração predatória, portanto, o impacto ambiental é minimizado quando as plantações florestais apresentam manejos eficientes, estabelecendo uma alternativa viável e sustentável no setor de produção florestal (ABRAF, 2013). Atualmente, as plantações florestais são utilizadas principalmente para fins comerciais, como a fabricação de painéis laminados, compensados, madeira serrada, papel, celulose, carvão vegetal e outros produtos, que são importantes no abastecimento do mercado interno, e colocam o Brasil em posição de destaque na exportação do setor florestal (IBÁ, 2021).

Pinus taeda L. é uma das principais espécies florestais cultivadas em solos brasileiros e, atualmente os plantios das espécies do gênero *Pinus* ocupam 1,7 milhões de hectares, e estados do Paraná e Santa Catarina constituem 67% do total da área cultivada no Brasil (IBÁ, 2021). Nos últimos anos, o aprimoramento de práticas silviculturais, combinado com o melhoramento genético, resultou em plantações de *Pinus taeda* com elevadas produtividades em solos brasileiros, com valores médios de $32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IBÁ, 2021; MORO et al., 2014).

Originário da América do Norte, o *Pinus taeda* teve boa adaptação às condições edafoclimáticas do sul do Brasil (MOTTA et al., 2014). Mas devido à baixa fertilidade da maioria dos solos brasileiros, à ausência frequente de fertilização e calagem (BELLOTE et al., 1998) e à alta taxa de exportação de nutrientes, tem-se observado uma diminuição do potencial de produtividade do *Pinus taeda* dessas áreas (GATIBONI et al., 2020). Pesquisas avaliando respostas à adubação mineral e orgânica, em plantações de *Pinus* de diferentes espécies, mostraram resultados positivos nas relações entre produtividade e atributos químicos do solo, melhorando satisfatoriamente o crescimento das espécies quando da aplicação de fertilizantes de maneira apropriada (ALBAUGH et al., 2010; ALBAUGH et al., 2017; BATISTA et al., 2015).

Outras pesquisas relataram que, após sucessivos ciclos, a exploração sem a reposição de nutrientes tende a promover deficiência nutricional nas espécies, resultando em baixas produtividades nas plantações florestais (GATIBONI et al.,

2017; GATIBONI et al., 2020). Pesquisas com avaliação dos atributos microbiológicos do solo e suas relações com outros atributos químicos têm mostrado que a mineralização do nitrogênio é um bom indicador para o complemento da fertilização em áreas de plantações comerciais de *Pinus* e Eucalipto (LÓPEZ-POMA et al., 2020; MOSCATELLI et al., 2008). Outros trabalhos mostraram que boas práticas de fertilização promovem resultados positivos nos atributos químicos e microbiológicos do solo, especialmente na mineralização do nitrogênio e no carbono da biomassa microbiana (SAGLIKER et al., 2018; THOMAZINI et al., 2015). Enquanto estudos com manejos florestais intensivos e sem reposição de nutrientes demonstraram baixas taxas de nitrogênio mineralizado e, em alguns casos, até o potencial esgotamento do nitrogênio do solo (BARRETO-GARCIA et al., 2010; MA et al., 2017; MOSCATELLI et al., 2008).

A avaliação da aplicação de fertilizantes químicos nos solos de *Pinus taeda*, e suas relações com os atributos físicos e químicos do solo e a produtividade são mais frequentes para plantações florestais (CONSALTER et al., 2021; RODRIGUEZ et al., 2018). Pinto et al. (2023) ao avaliarem as relações da produtividade do *Pinus taeda* com atributos edáficos identificaram o estoque de carbono e o teor de argila como os atributos que mais influenciaram o crescimento da espécie; no entanto, os métodos de análise química não foram suficientes para mostrar quais elementos minerais estavam relacionados com o crescimento do *Pinus taeda*. A análise de atributos microbiológicos do solo vem ganhando força e consenso como indicadores de qualidade do solo na produtividade florestal (LÓPEZ-POMA et al., 2020; YAO et al., 2017). A microbiologia do solo tem papel importante na entrada e saída de nutrientes no solo, e geralmente existem particularidades na biogeoquímica, conforme o sistema de cultivo, como, por exemplo, no tempo de mineralização dos elementos ou nos efeitos dos nutrientes sobre a atividade microbiana (GAUDIO et al., 2015; KELLER et al., 2013).

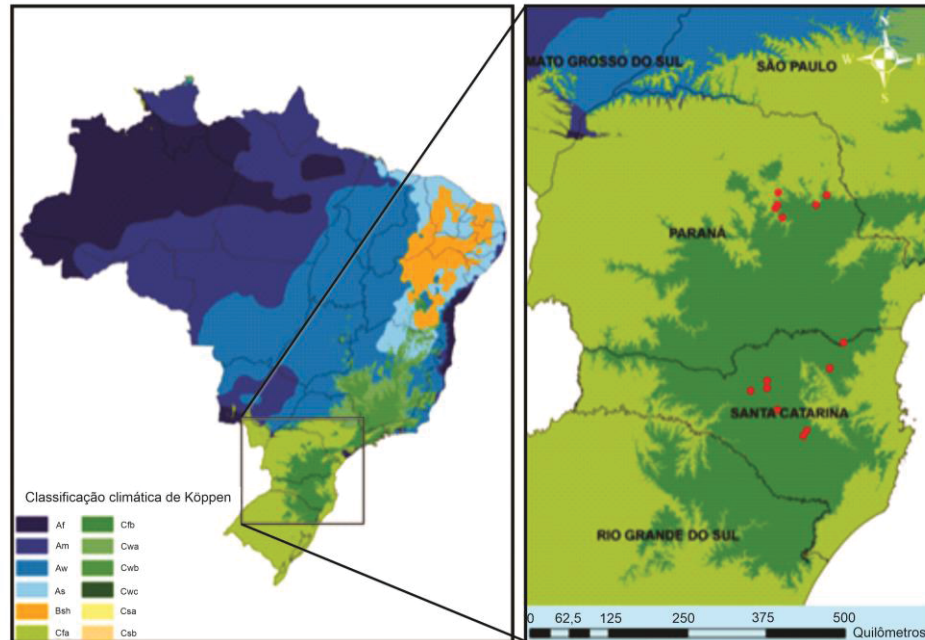
As relações entre os parâmetros químicos e microbiológicos do solo são importantes para uma compreensão mais ampla do sistema florestal, e o Programa Cooperativo sobre Produtividade Potencial do *Pinus* no Brasil (PPPIB) tem como um dos objetivos, investigar os principais fatores que alteram a produtividade do *Pinus* no Brasil. Este capítulo visa dar continuidade às pesquisas já realizadas; aqui, especificamente, relacionando os atributos edáficos, químicos e microbiológicos do solo em plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Áreas de estudo

As amostras de solo foram coletadas em plantações de *Pinus taeda* localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina, que integram o PPPIB. Na época da coleta das amostras de solo, as plantações tinham em média dezoito anos de idade e totalizaram quatorze parcelas de *Pinus taeda* sem e com fertilização aos oito anos de idade. As parcelas são constituídas por oito linhas compostas com doze árvores, totalizando 96 por parcela, em espaçamento 2 m entre linhas por 3 m entre árvores. Para este estudo, foram analisadas oito parcelas de tratamentos de *Pinus taeda* fertilizado e não fertilizado, totalizando dezesseis tratamentos, com três repetições cada (FIGURA 1).

FIGURA 1 – Localização e classificação climática das parcelas de *Pinus taeda* com e sem fertilização localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de Pinto et al. (2023).

O clima predominante nas áreas de estudo foi classificado como Cfb, subtropical com verões amenos e sem estação seca (KÖPPEN, 1936), com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a temperatura média do mês

mais quente inferior a 22°C, média de 1600 mm de precipitação anual com ocorrência de geadas (INMET, 2021). A fertilização foi realizada a lanço com os seguintes adubos: ureia (300 kg ha⁻¹), superfosfato simples (400 kg ha⁻¹), cloreto de potássio (250 kg ha⁻¹), calcário dolomítico (2000 kg ha⁻¹) e Micro FT 12 (200 kg ha⁻¹). Mais detalhes dos dados meteorológicos e adubação das parcelas de estudo, podem ser obtidos em Pinto (2020). As localizações e as classes de solos das parcelas de estudo com tratamentos fertilizado e não fertilizado estão apresentadas na TABELA 1.

TABELA 1 – Localização e classe de solo das parcelas de estudo de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado (F) e não fertilizado (NF) nos estados do Paraná e Santa Catarina.

Município	Parcela	Trat.	Coordenadas	Classe de solo	Altitude (m)
Lébon	SC.B1	NF	26°74'68" S	NEOSSOLO LITÓLICO	1279
Régis/SC	SC.B1f	F	50°72'89" W	Húmico típico	
Palmeira/SC	SC.C3	NF	27°53'88" S	CAMBISSOLO HÚMICO	883
	SC.C3f	F	50°14'52" W	Alumínico típico	
Itaiópolis/SC	SC.A2	NF	26°56'28" S	CAMBISSOLO HÚMICO	972
	SC.A2f	F	49°72'90" W	Distrófico típico	
Rio	SC.A1	NF	26°19'38" S	CAMBISSOLO HÚMICO	983
Negrinho/SC	SC.A1f	F	49°51'78" W	Distrófico típico	
Arapoti/PR	PR.B1	NF	24°21'92" S	LATOSSOLO VERMELHO-	756
	PR.B1f	F	49°96'61" W	AMARELO Distrófico típico	
Arapoti/PR	PR.B2	NF	24°07'85" S	LATOSSOLO VERMELHO	830
	PR.B2f	F	49°80'08" W	Distrófico típico	
Curiúva/PR	PR.B3	NF	24°04'48" S	LATOSSOLO VERMELHO	720
	PR.B3f	F	50°56'11" W	Distrófico típico	
Telêmaco	PR.A3	NF	24°27'35" S	CAMBISSOLO HÁPLICO	783
Borba/PR	PR.A3f	F	50°60'42" W	Tb Distrófico latossólico	

Fonte: Adaptado de Pinto (2020).

4.4.2 Amostragem de solos e análises laboratoriais

As amostras de solo foram coletadas dentro das parcelas/tratamento de estudo, na profundidade de 0-10 cm. As coletas foram realizadas em 15 pontos por tratamento, então agrupados 5 pontos em uma amostra composta, resultando em 3

repetições por tratamento. As análises dos atributos microbiológicos foram realizadas conforme descrito nos itens 2.2 a 2.5.

Amostras de solo de 0-10 cm de profundidade foram utilizadas para a análise química, sendo determinados o pH CaCl₂, o Ca e Mg trocáveis extraídos por KCl 1 mol L⁻¹, P e K com extrator Mehlich I. N e C foram determinados por combustão total no Analisador Elementar Vario El III e a matéria orgânica foi calculada de acordo com o teor de carbono no solo. A granulometria foi realizada de acordo com o método do densímetro de Bouyoucos (GEE; OR, 2002) (TABELA 2).

TABELA 2 - Atributos químicos e granulométricos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado (F) e não fertilizado (NF) nos estados do Paraná e Santa Catarina.

Parcela	Trat.	pH	Ca	Mg	K	P	C	N	Argila	MO
		CaCl ₂	-----mg kg ⁻¹ -----				-----g kg ⁻¹ -----			g kg ⁻¹
SC.B1	NF	3,8	27,7	23,9	42,7	42,2	70,1	4,3	438	120,6
SC.B1f	F	3,8	40,3	32,9	52,7	67,5	76,9	4,9		132,3
SC.C3	NF	3,5	40,3	36,6	61,7	19,7	36,1	2,2	550	62,1
SC.C3f	F	3,9	191,8	97,1	101,7	29,1	41,0	2,0		70,5
SC.A2	NF	3,4	10,2	22,2	17,0	5,9	47,5	2,6	688	81,7
SC.A2f	F	3,6	116,0	68,3	27,3	36,1	29,2	1,5		50,2
SC.A1	NF	3,7	16,4	24,5	22,3	45,5	24,0	1,4	400	41,3
SC.A1f	F	3,7	24,4	31,5	21,3	22,6	18,7	1,3		32,2
PR.B1	NF	3,8	66,1	24,9	60,7	11,2	26,4	1,7	150	45,4
PR.B1f	F	4,1	165,5	58,0	57,7	12,6	34,7	2,2		59,7
PR.B2	NF	3,4	59,7	24,1	22,3	6,7	29,8	2,0	688	51,3
PR.B2f	F	3,6	107,6	44,9	28,0	10,5	26,4	1,7		45,4
PR.B3	NF	3,8	39,9	18,3	62,7	4,3	29,8	2,0	438	51,3
PR.B3f	F	3,7	226,5	59,9	41,0	19,3	30,2	2,0		51,9
PR.A3	NF	3,7	16,8	30,1	15,0	5,5	24,3	1,2	238	41,8
PR.A3f	F	3,9	83,4	67,5	22,0	5,3	21,8	1,2		37,5

Fonte: Adaptado de Pinto (2020). pH (CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹); Ca²⁺, e Mg²⁺ (extraído em KCl 1 mol L⁻¹); carbono total (C) e nitrogênio total (N) (determinado por combustão total); K⁺ (extraído por Mehlich⁻¹); P (extraído em ácido cítrico). MO (matéria orgânica).

4.4.3 Análise estatística

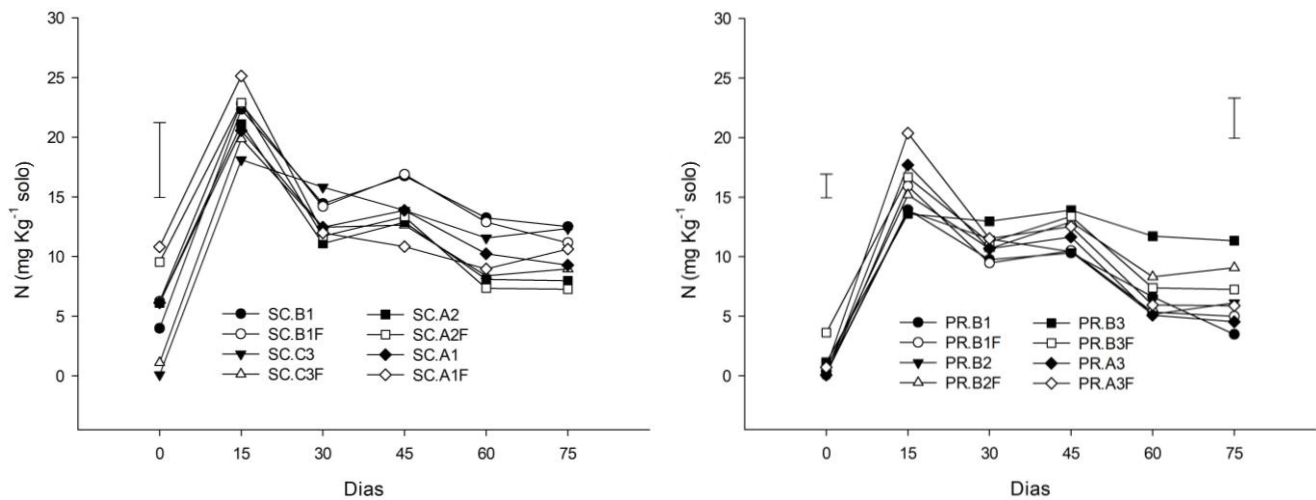
Para analisar o efeito da fertilização sobre os atributos microbiológicos do solo, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e à comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software R Studio (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019). Para avaliar as relações entre os atributos químicos do solo e os atributos microbiológicos foram realizadas correlações lineares (PEARSON), no software estatístico Past 4.01 (HAMMER et al., 2001). A análise de componentes principais (ACP) foi realizada usando o software MINITAB versão 19 (MCKENZIE e GOLDMAN, 1999). Na ACP, os autovalores e autovetores são associados a cada componente principal (CP), e quando um autovalor é maior que 1, as CPs são significativas (DEKA e DUTTA, 2016; GOULARTE, 2018). Os autovetores e autovalores foram obtidos através da transformação linear dos dados, pela matriz de correlação dos atributos analisados nos sítios de *Pinus taeda*. Os dados foram obtidos através da padronização e normalização das variáveis escolhidas e, em seguida, calculado a matriz de correlação considerando 12 variáveis de atributos.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Mineralização do nitrogênio

O ensaio de mineralização do nitrogênio mostrou que as maiores taxas encontradas foram nos tratamentos provenientes de sítios de *Pinus taeda* do estado de Santa Catarina (SC.B1, SC.B1f, SC.C3, SC.C3f, SC.A2, SC.A2f, SC.A1, SC.A1f), com o maior pico de mineralização (25,1 mg kg⁻¹ solo) na parcela fertilizada SC.A1f. A mineralização de nitrogênio nos tratamentos do estado do Paraná (PR.B1, PR.B1f, PR.B2, PR.B2f, PR.B3, PR.B3f, PR.A3, PR.A3f) mostrou menores taxas de N mineralizado em relação aos sítios do estado de Santa Catarina, com pico máximo de 20,4 mg kg⁻¹ solo, para a parcela fertilizada PR.A3f. Em todos os sítios de plantações de *Pinus taeda*, fertilizado ou não, a taxa máxima de mineralização foi aos 15 dias de incubação, diminuindo gradativamente até o final do ensaio, aos 75 dias de incubação (FIGURA 2).

FIGURA 2 – Taxa de nitrogênio mineralizado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.



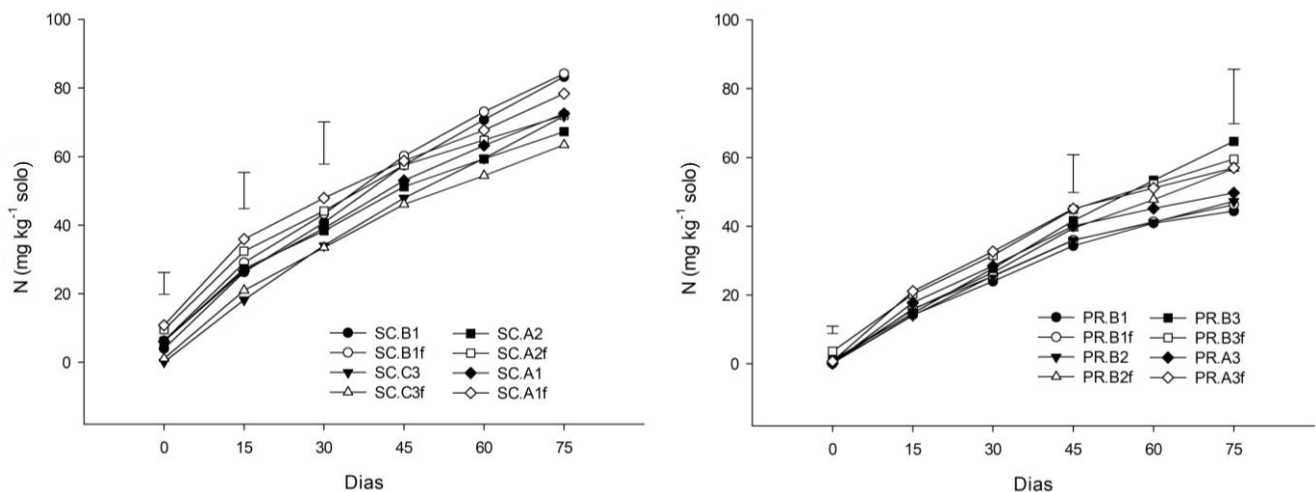
A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Outros estudos que analisaram a mineralização do nitrogênio também encontraram maiores valores aos 15 dias após a incubação anaeróbica (YAGI et al., 2009). Geralmente, no período inicial de incubação, as frações mais lábeis de nitrogênio orgânico são metabolizadas predominantemente pelos microrganismos presentes no solo (GONÇALVES et al., 2001), contribuindo para o fornecimento de nitrogênio aos solos florestais (GAUDIO et al., 2015). Dridi e Gueddari (2019) estudaram a dinâmica da mineralização do N em quatro classes de solos da Tunísia, em Cambissolos, e encontraram taxas de N mineral com picos próximos a 20 mg kg⁻¹ solo para N na forma de amônio (N-NH₄⁺); e conforme o período de incubação avançou o N inorgânico foi diminuindo gradativamente até o final da incubação. Os primeiros 15 dias de incubação de solos de *Pinus taeda* foi caracterizado por rápida mineralização do N, que faz parte da labilidade natural da matéria orgânica do solo (MÜLLER, 2016), enquanto que o período após o pico de mineralização foi caracterizado pela fração da matéria orgânica do solo, química e fisicamente, mais estável e mais resistente à degradação microbiológica (JEDIDI et al., 1995). Logo, um dos motivos da liberação lenta do N inorgânico seria a existência de ligações

químicas formadas entre os compostos húmicos ricos em nitrogênio com óxidos de ferro (UZOHU e IGBOJIONU, 2014; WANG et al., 2006).

A curva de nitrogênio mineral acumulado mostrou comportamento semelhante para todos os sítios, indicando padrão linear. Para os solos do estado de Santa Catarina, os valores médios variaram entre 63,4 e 84,2 mg kg⁻¹ solo ao final do ensaio de incubação anaeróbica. Diferentemente dos valores médios obtidos na primeira extração, antes da incubação, o N inorgânico acumulado ao fim dos 75 dias de ensaio teve como destaque o tratamento SC.B1f, visto que até a terceira extração, aos 30 dias de incubação, o tratamento SC.A1f tinha a maior taxa de mineralização do N. Nos solos do estado do Paraná, aos 75 dias de acumulação do N inorgânico, os valores variaram de 44,4 a 64,7 mg kg⁻¹ solo de N mineral acumulado, destacando-se os tratamentos PR.B3f e PR.B3, com valores médios de 59,5 e 64,7 mg kg⁻¹ solo, respectivamente (FIGURA 3). Os valores encontrados permitem identificar dois grupos de curvas de respostas, com maior N mineral acumulado nos solos de Santa Catarina.

FIGURA 3 – Taxa de nitrogênio mineral acumulado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.



A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Gonçalves et al. (2001) avaliaram taxas de mineralização do N em sítios não fertilizados de *Pinus caribaea* de 20 anos de idade em Latossolos do estado de São Paulo; e encontraram valores de N mineralizado próximos de 45 mg kg⁻¹ solo. No presente estudo, os valores encontrados de N mineral acumulado foram em média de 55 mg kg⁻¹ solo.

Outros autores encontraram tendências semelhantes na mineralização acumulada de nitrogênio ao longo do tempo (MILLER et al., 2005; ZHAO et al., 2017). Camargo et al. (1997) estudaram a mineralização do N em Latossolos com plantações agrícolas do estado do Rio Grande do Sul; e encontraram o mesmo padrão no N mineralizado acumulado, com valores variando de 80 a 180 mg kg⁻¹ solo aos 75 dias de incubação; e os autores associaram a maior taxa de N acumulado em um dos Latossolos devido à matéria orgânica, onde o solo com maior taxa de N mineral acumulado teve 6% de MOS, enquanto os Latossolos com menor N mineral acumulado apresentavam cerca de 1,5% de MOS.

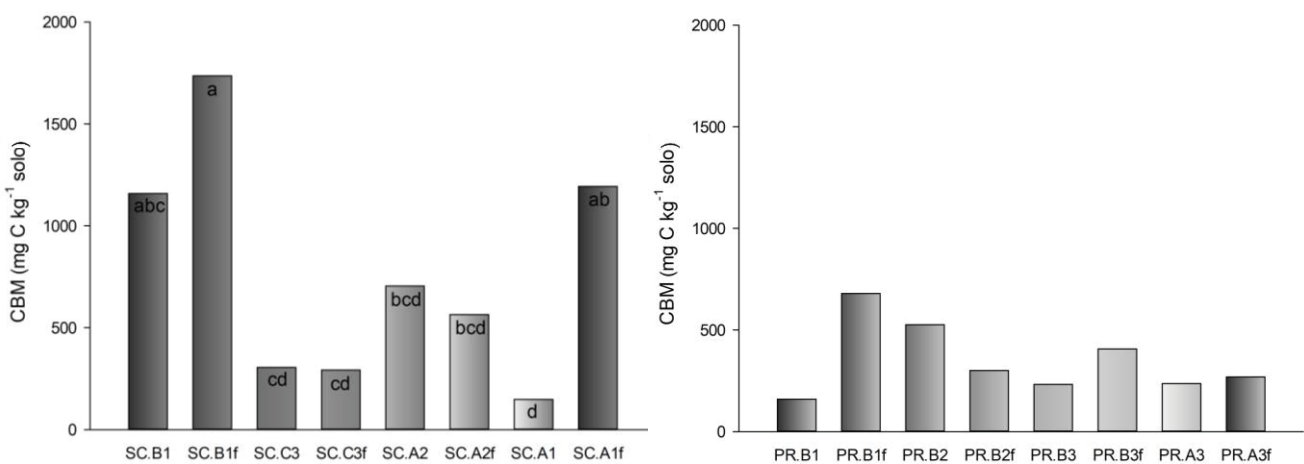
Neste estudo, a mineralização acumulada aos 75 dias de incubação ainda estava crescente, sobretudo em Santa Catarina e com uma tendência de estabilização mais visível nos solos do Paraná, que são os solos com menores teores de MOS. Além disso, outros fatores podem estar limitando a mineralização do N destes solos; o tratamento PR.B1, com 44 mg kg⁻¹ solo de N acumulado, mostrou o menor conteúdo de argila dentre todos os sítios experimentais, com valores médios de 150 g kg⁻¹ de argila e 763 g kg⁻¹ de areia. O conteúdo de argila é um fator importante na atividade microbológica do solo, pois a argila está diretamente relacionada com a MOS (GONÇALVES et al., 2002), pois promove a formação de agregados no solo. E tem relação direta com a disponibilidade hídrica, pois solos com textura arenosa podem favorecer a perda de nutrientes por lixiviação (SHARPLEY e WANG, 2014); e, assim, diminuir o estoque de elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento de microrganismos do solo (DIECKOW et al., 2005).

4.5.2 Carbono da biomassa microbiana

O carbono da biomassa microbiana do solo variou significativamente entre os sítios de *Pinus taeda*, e assim como no ensaio de mineralização do nitrogênio, os maiores valores foram encontrados nos sítios de Santa Catarina, com média de

CBM, 117% superior aos sítios de *Pinus taeda* do estado do Paraná, considerando a média de todos os tratamentos. No geral, a média de CBM para os sítios de Santa Catarina foi de 763 mg C kg⁻¹ solo, e apresentou diferenças entre os tratamentos, enquanto os sítios do Paraná, tiveram média de 351 mg C kg⁻¹ solo, e não houve diferença significativa entre os tratamentos (FIGURA 4).

FIGURA 4 – Carbono da biomassa microbiana na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nos sítios de *Pinus taeda* de Santa Catarina, observa-se diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%, e o maior valor foi para o tratamento SC.B1f, com média de carbono da biomassa microbiana de 1735 mg C kg⁻¹ solo, seguidos dos tratamentos SC.A1f e SC.B1, com média de CBM de 1194 e 1158 mg C kg⁻¹ solo, respectivamente. Os tratamentos SC.B1f e SC.A1f, fertilizados aos 8 anos de idade, evidenciam efeito positivo da fertilização na microbiologia do solo, enquanto o tratamento SC.B1, não fertilizado, teve valores significativamente menores de CBM, em comparação a sua parcela fertilizada (SC.B1f). Porém, os valores de biomassa microbiana desta parcela (SC.B1 e SC.B1f) são consideradas altas em relação a outros estudos (SOUZA et al., 2021), e isso se deve a outras características do solo, além da fertilização, como, por exemplo, o teor de matéria orgânica, com valores entre 12 e 13% nesta parcela, contribuindo para o estoque de carbono. Em sítios de

Pinus, porém, de outros gêneros, outros autores também encontraram elevados valores de biomassa microbiana do solo (GONÇALVES et al., 2002; TATE et al., 2007), e atribuíram a diferentes fatores do solo, como a textura, a própria matéria orgânica, e ao manejo do solo. A combinação destes fatores (textura, MOS e fertilização) nos tratamentos SC.B1 e SC.B1f, que apresentou 438 g dm⁻³ de argila e 12 e 13%, respectivamente, de MOS, foram relevantes para os altos valores de CBM destes tratamentos, os resultados são maiores em comparação a outras pesquisas em plantações de *Pinus taeda* no Brasil (GONÇALVES et al., 2002; PRIMIERI et al., 2017).

Nos sítios do Paraná, não houve diferença significativa entre os tratamentos fertilizados e não fertilizados para o CBM, e as localidades não tiveram grandes variações de valores do carbono microbiano do solo. Mas, em valores absolutos, o tratamento PR.B1f, foi superior ao tratamento PR.B1, não fertilizado. Porém, não se observa o mesmo comportamento em outras parcelas, ou seja, o efeito da fertilização não teve um comportamento padrão nos sítios de *Pinus taeda* do Paraná. Um fator que pode explicar a não diferença entre a fertilização nestes solos, é a matéria orgânica ser significativamente menor nas parcelas paranaenses, quando comparada a MOS de Santa Catarina, a média geral dos solos paranaenses foi de 4% de MOS, enquanto os solos catarinenses tiveram média de 9% de matéria orgânica, evidenciando a importância da matéria orgânica nos atributos microbiológicos do solo (FU et al., 2019; SAGLIKER et al., 2018).

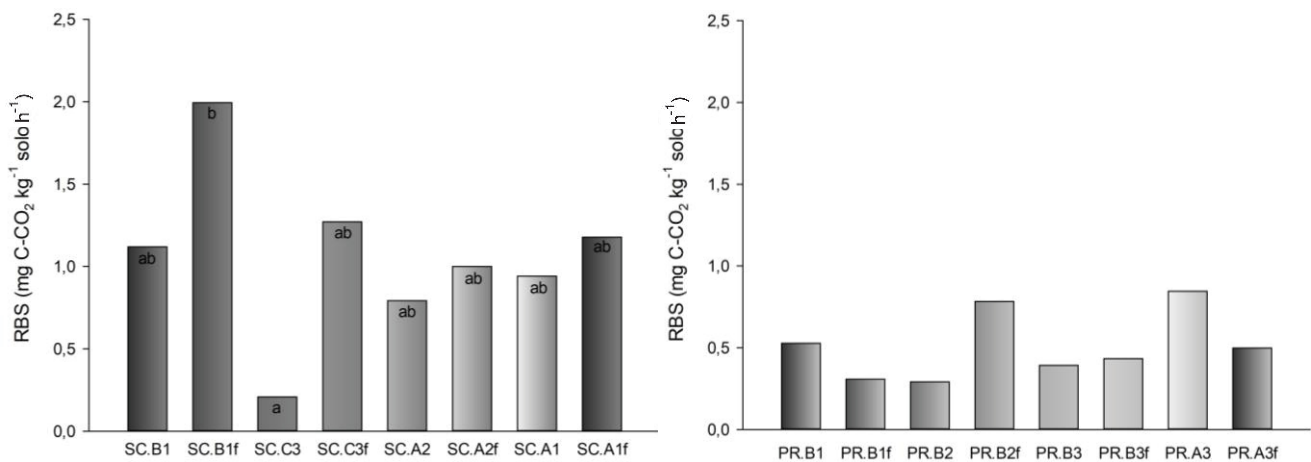
4.5.3 Respiração basal do solo e quociente metabólico

A respiração basal do solo (RBS) é um atributo microbiológico do solo que pode ser avaliado pela quantidade de CO₂ obtido após a incubação controlada das amostras de solo (JENKINSON e POWLSON, 1976). É representada pela soma das funções metabólicas de microrganismos do solo, principalmente bactérias e fungos, responsáveis por produzir carbono na forma de dióxido (C-CO₂) via degradação da matéria orgânica (SILVA et al., 2007).

De modo geral, a respiração basal do solo apresentou tendência semelhante aos outros atributos microbiológicos do solo, como a mineralização do N e o CBM. Nos sítios de Santa Catarina, nota-se diferenças entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%, e se observa que todos os tratamentos com fertilização mineral aos 8

anos de idade foram superiores aos tratamentos sem fertilização mineral. Os maiores valores de RBS foram para SC.B1f e SC.B1, com valores de 1,99 e 1,20 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente, e o tratamento fertilizado SC.B1f, foi significativamente superior aos demais. Nos solos do Paraná, a RBS teve menor variação entre os tratamentos, com valores entre 0,31 e 0,78 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, sem apresentar diferença significativa entre os sítios de *Pinus taeda* ou entre áreas fertilizadas e sem fertilização (FIGURA 5).

FIGURA 5 – Respiração basal do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, localizadas nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados deste estudo mostram que os tratamentos variaram significativamente nos sítios de Santa Catarina, e tiveram valores médios de 1,06 e 0,51 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹, respectivamente, para Santa Catarina e Paraná. Os resultados são próximos de outros estudos que avaliaram a respiração microbiana em ecossistemas com vegetação nativa e plantações florestais comerciais (ASSIS JÚNIOR et al., 2003; PEÑA et al., 2005; SAMUELSON et al., 2009).

Samuelson et al. (2009) estudaram o efeito da adubação em *Pinus taeda* na respiração basal do solo no estado da Carolina do Sul, nos Estados Unidos; e os autores encontraram resultados de RBS fortemente correlacionados com a textura do solo; e afirmaram, ainda, que a fertilização contribuiu para aumentar a RBS,

devido à adição de fertilizantes mitigar a limitação de nutrientes no solo, permitindo que os microrganismos utilizassem o carbono do metabolismo de excesso para constituição da sua biomassa microbiana (SCHIMEL e WEINTRAUB, 2003). Nos solos do Paraná, a fertilização não seguiu o padrão dos sítios de Santa Catarina, e isso pode estar relacionado com os fatores edáficos, principalmente os menores teores de argila nos solos do Paraná em comparação aos solos de Santa Catarina.

O quociente metabólico variou entre 0,6 e 5,5 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM h⁻¹ sem apresentar um padrão claro entre sítios ou entre áreas com e sem fertilização, tanto para os solos de Santa Catarina como do Paraná (TABELA 3).

TABELA 3 – Valores médios do quociente metabólico (qCO_2) na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado.

Tratamentos (SC)							
SC.B1	SC.B1f	SC.C3	SC.C3f	SC.A2	SC.A2f	SC.A1	SC.A1f
qCO_2 (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)							
0,9	1,1	3,6	4,4	1,3	1,8	5,0	1,3
Tratamentos (PR)							
PR.B1	PR.B1f	PR.B2	PR.B2f	PR.B3	PR.B3f	PR.A3	PR.A3F
qCO_2 (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)							
3,5	0,6	0,6	3,9	5,5	1,2	3,6	2,6

SC = Santa Catarina. PR = Paraná. f = Fertilizado.

O quociente metabólico, que é a razão entre a RBS e o CBM, é representada pela quantidade de C-CO₂ liberada por unidade de carbono da biomassa microbiana (ARAGÃO et al., 2020). O qCO_2 pode ser compreendido como a atividade dos microrganismos do solo, mas altos valores de qCO_2 pode refletir alta demanda de carbono para manutenção do sistema solo e a interpretação deve ser cautelosa, por ser um quociente fisiológico (ANDERSON e DOMSCH, 2010). Os maiores valores foram encontrados nos sítios não fertilizados PR.B3 e SC.A1, mas não necessariamente está ocorrendo diretamente o efeito da fertilização mineral no quociente metabólico. A maioria dos estudos, mostram que sistemas com baixa eficiência metabólica de microrganismos, ou seja, com maiores valores qCO_2 , estão associados com o manejo inadequado do solo (DINIZ et al., 2014), resultando em estresse ao sistema agrícola e/ou florestal (KASCHUK et al., 2010).

Oдум (1985) relatou que o valor de qCO_2 tem redução conforme o aumento da maturidade do solo; ou seja, em solos com melhores utilizações conforme sua aptidão. No entanto, deve se ter alguns cuidados ao interpretar os resultados do qCO_2 , pois valores altos podem refletir a alta manutenção da demanda de carbono, e se o sistema solo-planta não reabastece, o carbono é perdido através da respiração, portanto, combinar o qCO_2 com outros atributos permite uma melhor interpretação das análises microbiológicas do solo (ANDERSON e DOMSCH, 2010).

Silva et al. (2010) encontraram valores de qCO_2 , até cinco vezes maiores para cultivos convencionais agrícolas em relação à áreas de Cerrado nativo, os autores relataram que esses resultados mostraram que os cultivos agrícolas, caracterizados por revolvimento do solo e uso inadequado de fertilizantes minerais e agrotóxicos, apresentaram biomassa microbiana menos eficiente na utilização dos compostos orgânicos, além do manejo do solo, outro fator que os autores constataram, foi a composição vegetal que influenciou na biomassa microbiana do solo. Nossos resultados de qCO_2 sugerem que alguns sítios podem estar com o estoque de carbono em desequilíbrio (SC.A1 e PR.B3), e até perdendo carbono para a atmosfera devido à baixa eficiência na utilização do carbono (MANIRAKIZA et al., 2020). Sistemas de manejos mais eficientes perdem menos carbono na forma de CO_2 , portanto, apresentam biomassa mais eficaz durante a ciclagem de nutrientes (PRIMIERY et al., 2017; MARQUES et al., 2015).

4.5.4 Relações entre os atributos microbiológicos, químicos e físicos do solo e o efeito da fertilização mineral

Dentre todas as correlações testadas entre os atributos microbiológicos do solo, matéria orgânica do solo e o teor de argila, oito se correlacionaram e seis não se correlacionaram, nos sítios de *Pinus taeda* dos estados de Santa Catarina e do Paraná. Os coeficientes de correlação mais expressivos foram CBM x MOS ($r = 0,77$), CBM x RBS ($r = 0,68$), CBM x qCO_2 ($r = 0,67$), Nmin x RBS ($r = 0,65$) e Nmin x CBM ($r = 63$). O teor de argila teve correlação positiva apenas com o atributo Nmin ($r = 58$) (TABELA 4).

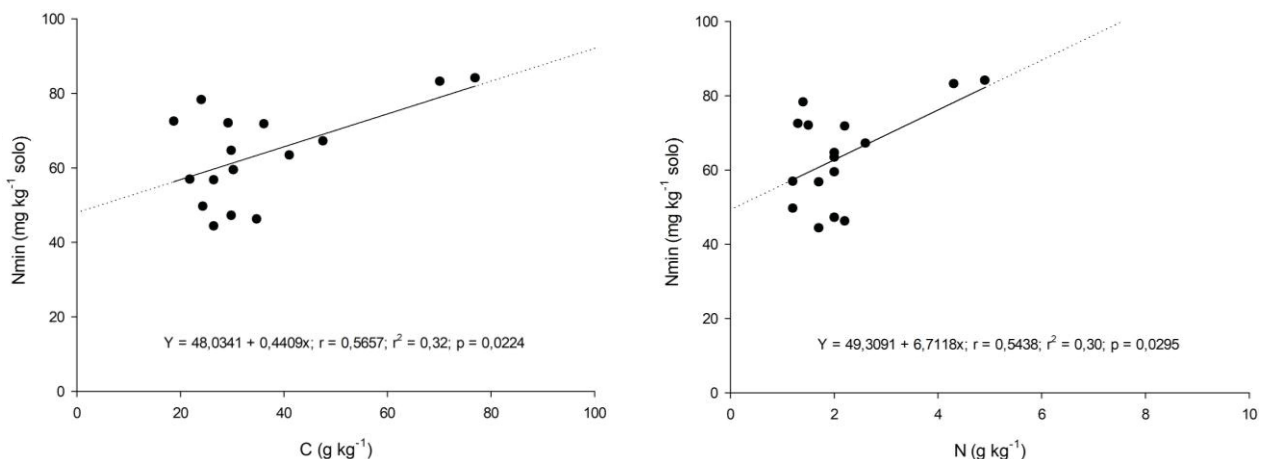
TABELA 4 – Coeficiente de correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos do solo e teor de argila das áreas de *Pinus taeda* nos estados de Santa Catarina e do Paraná.

	Nmin	CBM	RBS	qCO ₂	MOS	Argila
Nmin	-	0,63*	0,65*	-0,09*	0,57*	0,58*
CBM	-	-	0,68*	-0,67*	0,77*	0,11
RBS	-	-	-	-0,11*	0,59*	0,17
qCO ₂	-	-	-	-	-0,42	-0,37
MO	-	-	-	-	-	0,24

Pares de variáveis com coeficiente de correlação positivos e valores ($p < 0,05$) tendem a aumentar juntos. Pares com coeficiente de correlação negativa e valores ($p < 0,05$), uma das variáveis tende a diminuir enquanto a outra aumenta. Pares com valores ($p > 0,05$) não há relação significativa entre as duas variáveis. * = significativo.

Os atributos químicos e físicos do solo que se correlacionaram de maneira positiva com os atributos microbiológicos foram: o carbono, o nitrogênio, o fósforo e o teor de argila do solo. O nitrogênio mineral acumulado se correlacionou positivamente com o carbono e o nitrogênio total do solo (FIGURA 6).

FIGURA 6 – Correlações entre o nitrogênio mineralizado e o carbono e nitrogênio total do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina.

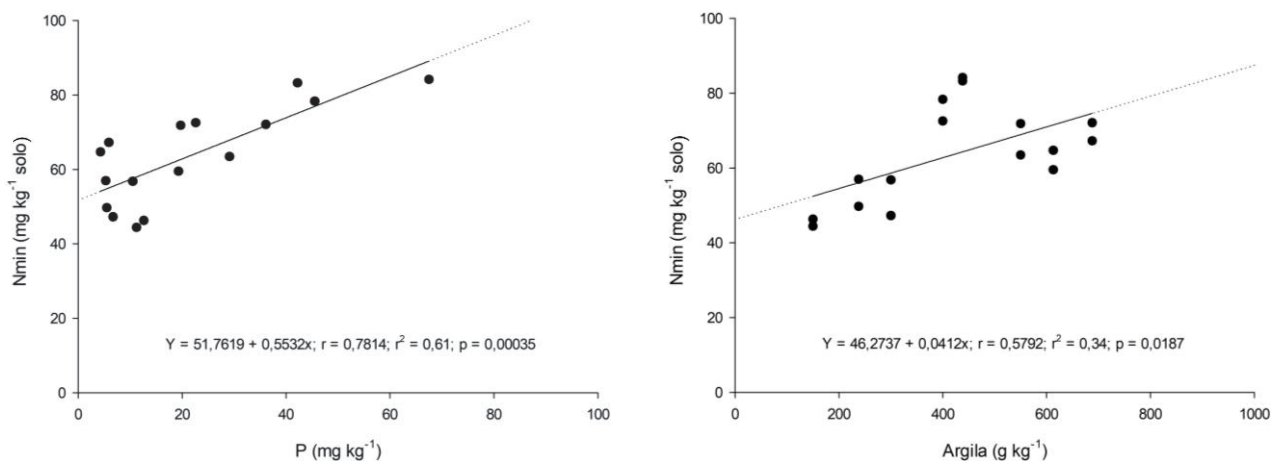


O teor de carbono e nitrogênio total são fatores com fortes relações na microbiota do solo, e a sua disponibilidade interfere diretamente na composição microbiana, pois, grande parte dos microrganismos apresentam quantidade

significativa de C e N em sua estrutura molecular (KASCHUK et al., 2010). Além disso, a relação C/N é outro fator preponderante para a estabilidade dos microrganismos no solo. Outras pesquisas avaliando a microbiologia no solo, relataram que os atributos microbiológicos tiveram boas correlações com o C e N do solo, e isso está diretamente ligado com a quantidade e a qualidade do material vegetal depositado no solo (SANTOS, 2007; SOUZA et al., 2021). A ciclagem de nutrientes nos sítios de *Pinus taeda* pode estar atuando e influenciando na microbiologia do solo, lembrando que as adições de fertilizantes, realizadas aos 8 anos, parecem ter influenciado a atividade microbiológica do solo 10 anos depois, provavelmente devido a uma melhor qualidade de serapilheira depositada sobre o solo após a fertilização.

Além do C e N, também foram encontradas correlações com o fósforo e o teor de argila do solo para o N mineral acumulado (FIGURA 7). Gonçalves et al. (1997) sugerem que boa parte da demanda de P pelas árvores ocorre por processos de mineralização da matéria orgânica, principalmente na camada superficial do solo, onde há maior acúmulo de MOS, uma vez que em solos ácidos quantidades expressivas de P são fixadas por óxidos de Fe e Al; e a MOS, além de liberar P pela mineralização, age com o bloqueio de sítios de fixação na superfície dos óxidos pelos ácidos orgânicos presentes no solo (GONÇALVES e BENEDETTI, 2000).

FIGURA 7 – Correlações entre o nitrogênio mineralizado, o fósforo ácido cítrico e o teor de argila do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina

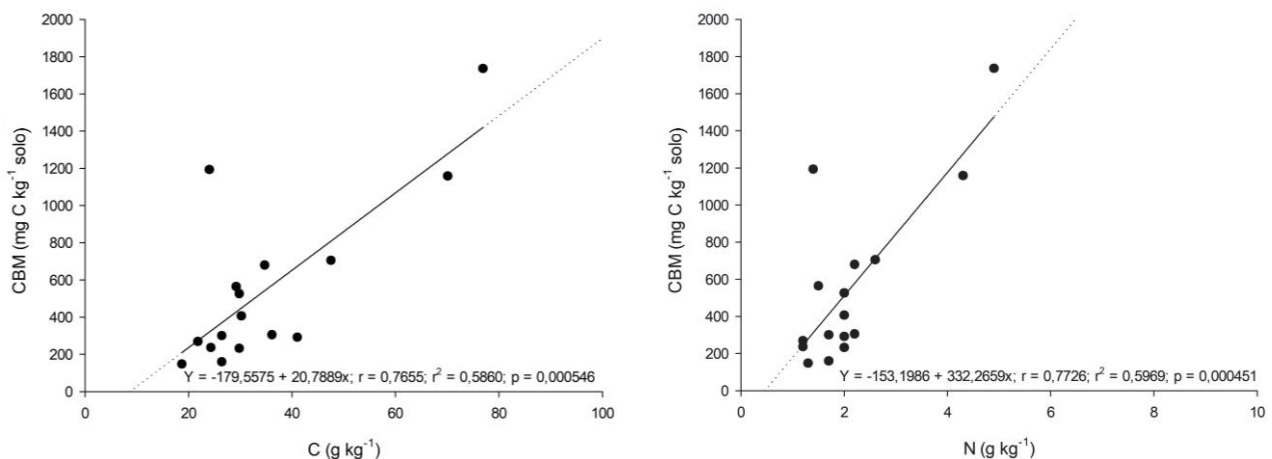


No estudo de Pinto (2020), foram relatadas boas correlações dos nutrientes do solo com o fósforo extraído por ácido cítrico em *Pinus taeda*; e a autora citou como um dos motivos a capacidade do ácido cítrico em extrair elementos complexados da MOS. Em plantações de *Pinus* são comuns solos ácidos e com baixa disponibilidade de P; no entanto, pode existir uma interação das plantas com ácidos orgânicos na rizosfera, onde há forte presença de microrganismos, e estes podem estar participando da solubilização de fosfatos de Fe e Al (HASHIMOTO, 2011; PINTO et al., 2023).

A correlação significativa entre o N mineral acumulado e a argila pode ser explicada pela relação direta que a argila tem com a umidade do solo; pois nos solos mais argilosos que acumulam mais umidade é menor a competição pelos nutrientes entre os microrganismos e as plantas, estas últimas com maiores atividades metabólicas, o que pode limitar o desenvolvimento microbiano em situações de maior competição (FU et al., 2019).

O carbono da biomassa microbiana mostrou melhores correlações com o carbono e nitrogênio do solo, com valores de r de 0,77 e 0,78, respectivamente (FIGURA 8). Portanto, o CBM foi o atributo microbiológico mais sensível para explicar tanto o C quanto o N no solo, em comparação aos outros atributos estudados (Nmin e RBS).

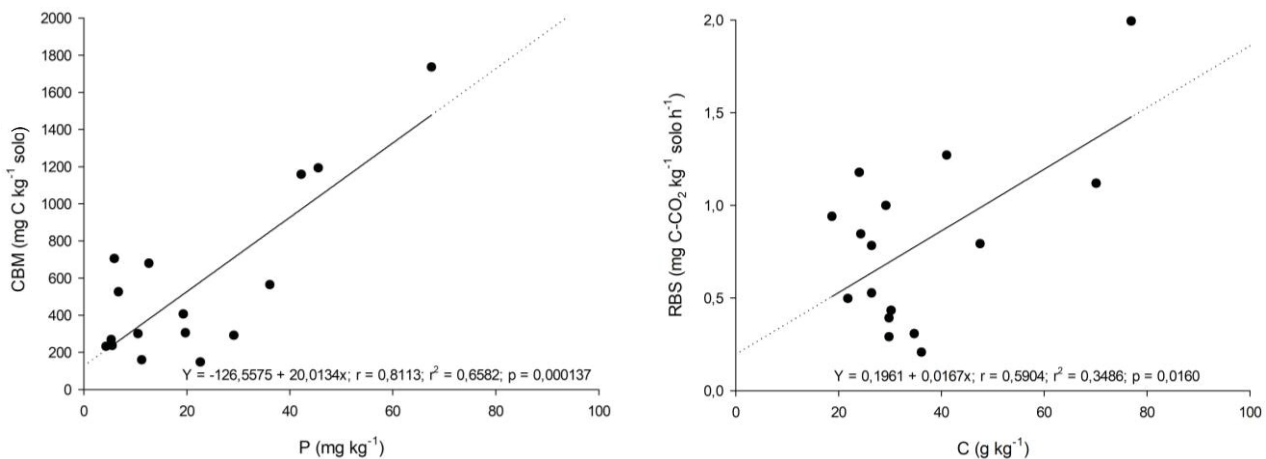
FIGURA 8 – Correlações entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono e nitrogênio do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Souza et al. (2021) estudaram atributos microbiológicos em áreas com *Eucalyptus* e Floresta Estacional Decidual; e, apesar de encontrarem valores médios inferiores de CBM que no nosso estudo, também relataram boas correlações do CBM com C e N do solo.

A respiração basal do solo seguiu tendência similar às outras correlações observadas, com correlações positivas com o carbono, nitrogênio e fósforo do solo; no entanto, essas correlações foram menos estreitas que as observadas para o CBM e o N mineral acumulado, sendo o C total do solo o atributo mais fortemente correlacionado com RBS (FIGURA 9).

FIGURA 9 – Correlações entre o carbono da biomassa microbiana e o fósforo do solo, e a respiração basal do solo e o carbono do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina.



Luo et al. (2017) destacaram que os principais fatores relacionados entre a dinâmica do carbono no solo e os microrganismos são: clima, física e química do solo, além dos componentes bióticos, que são responsáveis pela decomposição do resíduo da biomassa vegetal, e estão intimamente relacionados com a qualidade da matéria orgânica. Vale destacar que espécies de ciclo longo possuem vantagens em relação às espécies de cultivos anuais, como, por exemplo, maior tempo de permanência da biomassa vegetal no solo, o que conseqüentemente resultará em aportes frequentes de carbono ao solo (BRONICK e LAL, 2005). Samuelson et al. (2009) encontraram altas correlações entre a respiração e a biomassa microbiana do solo com a produtividade do *Pinus taeda* nos Estados Unidos, sob efeito da

fertilização. Esta adição de nutrientes em sítios de *Pinus taeda* aumentou o crescimento das raízes e, conseqüentemente, aumentou o carbono orgânico no solo; e os autores atribuíram as correlações da microbiologia do solo com o carbono como consequência da renovação de raízes, resultando em incremento de serapilheira e liberação de exsudatos pelas raízes do *Pinus*, com a microbiota do solo sendo favorecida em função da fertilização (PIETIKÄINEN et al., 2007).

De forma a compreender de uma forma mais ampla as relações entre as variáveis analisadas nos diferentes sítios, com e sem fertilização, e os atributos do solo foi realizada uma análise de componentes principais (ACP). Os resultados mostram que as CPs 1, 2, 3 e 4 explicam 80% da variação dos dados. A matriz de autovetores representa o peso de cada fator atributo do solo, na formação dos componentes principais, para o CP1 os autovetores mais associados foram P (0,41), CBM (0,40), C (0,39), N (0,38), Nmin (0,36) e RBS (0,36), resultando em associação direta. Enquanto o CP2 foi influenciado pelo Mg (0,50), Ca (0,47), K (0,43) e IMA (0,37). A CP1 explica 40% da variação total dos dados da matriz e a CP2 explica 20% dos dados (TABELA 5).

Tabela 5 – Indicadores de ajuste da análise de componentes principais (ACP) e autovetores associados aos fatores considerados nos atributos do solo em plantações de *Pinus taeda* nos estados de Santa Catarina e do Paraná.

	Componentes principais			
	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	5,0	2,7	1,4	1,0
Proporção	0,4	0,2	0,1	0,1
Acumulado	0,4	0,6	0,7	0,8
Fatores	Autovetores			
Nmin ¹	0,36	0,11	0,35	0,19
CBM ²	0,40	-0,12	-0,22	0,21
RBS ³	0,36	0,04	0,15	0,22
qCO ₂ ⁴	-0,20	0,13	0,67	-0,06
IMA ⁵	-0,08	0,37	0,05	0,51
P ⁶	0,41	0,12	-0,00	0,24
K ⁷	0,19	0,43	0,14	-0,25
Ca ⁸	-0,02	0,47	-0,33	-0,45
Mg ⁹	0,06	0,50	-0,36	0,16
C ¹⁰	0,39	-0,18	-0,01	-0,29
N ¹¹	0,38	-0,21	-0,02	-0,28
Argila ¹²	0,16	0,28	0,31	-0,32

Pares de variáveis com coeficiente de correlação positivos e valores ($p < 0,05$) tendem a aumentar juntos. Pares com valores ($p > 0,05$) não há relação significativa entre as duas variáveis. ¹Nmin = nitrogênio mineral acumulado; ²CBM = carbono da biomassa microbiana; ³RBS = respiração basal do solo; ⁴qCO₂ = quociente metabólico; ⁵IMA = incremento médio anual; ⁶P = fósforo (ác. cítrico); ⁷K = Potássio; ⁸Ca = cálcio; ⁹Mg = magnésio; ¹⁰C = carbono; ¹¹N = nitrogênio; ¹² = argila.

A CP1 está diretamente relacionada com o fósforo, CBM, Nmin, RBS, carbono e nitrogênio do solo, ou seja, o aumento da matéria orgânica do solo, representa aumento da qualidade microbiológica do solo. A CP2 explicou 20% dos dados, e está diretamente relacionada com as bases do solo (Ca, Mg e K).

Observa-se 2 agrupamentos para os sítios de *Pinus taeda*; o eixo 1 separou os sítios de Santa Catarina daqueles do Paraná (FIGURA 10). O agrupamento de de Santa Catarina se deve principalmente ao CBM, C, N, P, Nmin e RBS, com os maiores vetores; enquanto que qCO₂, IMA e Ca foram menos relacionado com esse agrupamento e mais ligados com as áreas de *Pinus taeda* do Paraná (FIGURAS 10 e 11).

FIGURA 10 – Gráficos de scores nos componentes principais dos atributos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina.

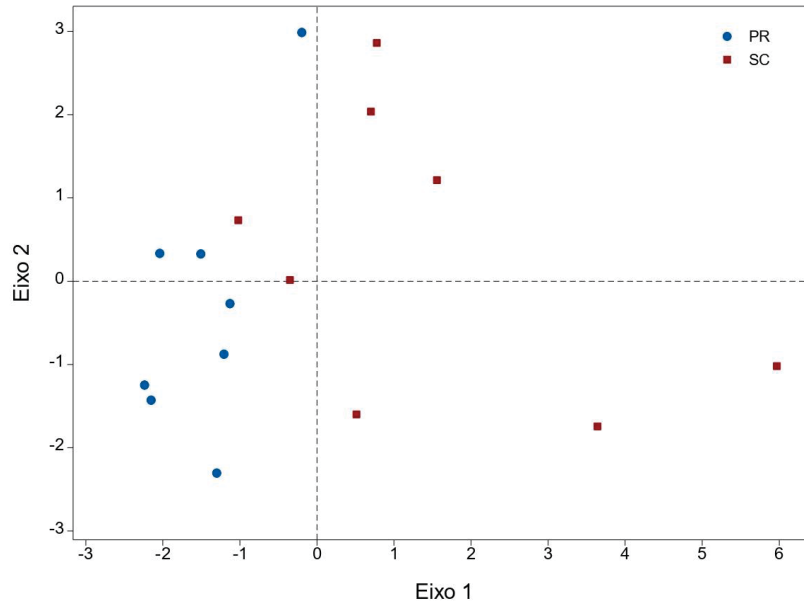
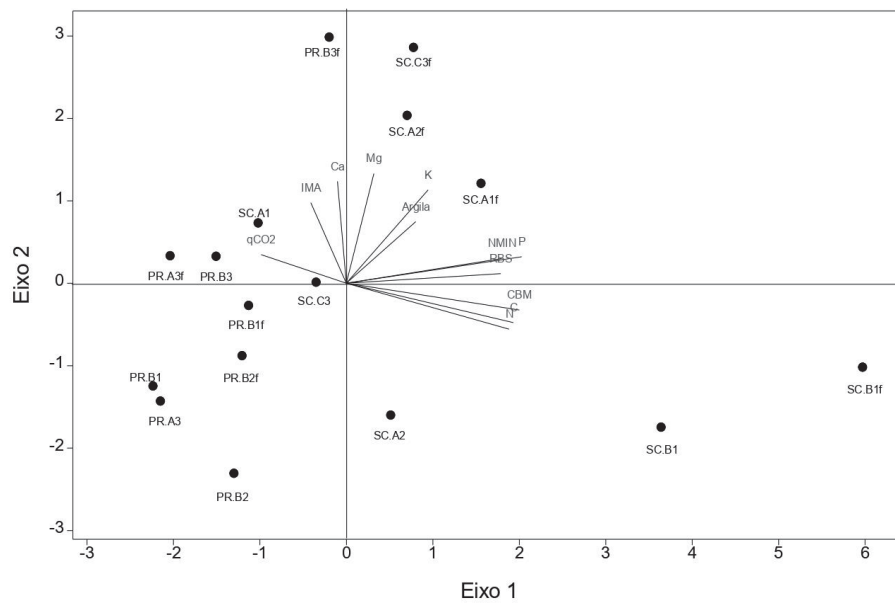


FIGURA 11 – Análise de componentes principais (ACP) dos atributos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de *Pinus taeda* sob tratamentos fertilizado e não fertilizado, nos estados do Paraná e Santa Catarina.



As correlações das variáveis mostram que o aumento do CP1 está relacionado com os principais fatores constituintes da matéria orgânica, como

carbono, nitrogênio e fósforo, além dos atributos microbiológicos do solo; ou seja, esses atributos do solo explicam principalmente as variações encontradas nos sítios de *Pinus taeda* do estado de Santa Catarina, que são as áreas com os maiores valores de atributos microbiológicos e matéria orgânica do solo. O qCO_2 teve pouca relação com os tratamentos de *Pinus taeda* de Santa Catarina, e teve direção inversa aos atributos CBM, N e C. Souza et al. (2021) observaram o quociente metabólico relacionado negativamente com a qualidade do solo em fragmentos de *Eucalyptus*; e o consideraram como um indicador de perturbações e desequilíbrio florestal.

4.6 CONCLUSÕES

Os atributos microbiológicos do solo se mostraram bons indicadores da fertilidade natural dos solos, o que foi possível de se constatar pelas diferenças observadas entre os sítios do Paraná e de Santa Catarina.

Os atributos microbiológicos do solo se mostraram viáveis para explicar o efeito da fertilização mineral no *Pinus taeda*, em alguns dos sítios estudados, sendo os resultados diretamente relacionados aos fatores edáficos de cada sítio.

O carbono da biomassa microbiana e a mineralização de nitrogênio foram os atributos microbiológicos melhor correlacionados com a qualidade do solo dos sítios em estudo.

Os teores de carbono do solo (MOS), de argila e de P foram atributos estreitamente relacionados com os atributos microbiológicos do solo.

4.7 REFERÊNCIAS

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. ABRAF, Brasília: 2013.

ALBAUGH, J. M.; BLEVINS, L. H.; ALLEN, L.; ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; STAPE, J. L.; RUBILAR, R. A. Characterization of foliar macro and micronutrient concentrations and ratios in loblolly pine plantations in the southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 34, n. 2, p. 53-64, 2010.

ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; RUBILAR, R. A.; COOK, R. L.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Post thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology Management**, v. 396, p. 207-216, 2017.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2039-2043, 2010.

ARAGÃO, O. B. S.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; CAPUTO, P. S. C.; RUFINI, M.; CARVALHO, G. R.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, F. M. S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, n. 1, p. 106205, 2020.

ASSIS JÚNIOR, S. J.; ZANUNCIO, J. C.; KASUYA, M. C. M.; COUTO, L.; MELIDO, R. C. N. Atividade microbiana do solo em sistemas agroflorestais, monoculturas, mata natural e área desmatada. **Árvore**, v. 27, n. 1, p. 35-41, 2003.

BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 63, n. 3, p. 301-309, 2015.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. **Enzimas e seu papel na qualidade do solo**. Tópicos em Ciência do Solo, 1 ed., v. 8, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 2-49.

BARRETO-GARCIA, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Carbon and nitrogen mineralization in soils under an *Eucalyptus* plantation chronosequence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010.

BATISTA, A. H.; MOTTA, A. C. V.; REISSMANN, C. B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I. L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 1, p. 117-125, Maringá, 2015.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais**. Boletim de Pesquisa Florestal. EMBRAPA. n. 37, p. 99-106. Colombo, 1998.

BROCK, O.; KOOIJMAN, A.; NIEROP, K. G. J.; MUYS, B.; VANCAMPENHOUT, K.; JANSEN, B. Disentangling the effects of parent material and litter input chemistry on molecular soil organic matter composition in converted forests in Western Europe. **Organic Geochemistry**, v. 134, n. 1, p. 66-76, 2019.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 575-579, 1997.

CONSALTER, R.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; VEZZANI, F. M.; RUBILAR, R. A.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; BASSACO, M. V. M. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 1095-1112, 2021.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. D. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 506-513, 2015.

DEKA, B.; DUTTA, M. Principal component analysis of soil properties in assessing erodibility indices in the Northern Brahmaputra plains of Assam. **Principal component analysis of soil properties in assessing erodibility indices in the 277 Northern Brahmaputra plains of Assam**, v. 15, n. 4, p. 277-283, 2016.

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

DINIZ, T.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ALENCAR, C. M.; JUNQUEIRA, N. T. V. Alterações microbianas e químicas de um gleissolo sob macaubeiras nativas em função da variação sazonal e espacial. **Bioscience Journal**, v. 30, p.750-762, 2014.

DRIDI, I.; GUEDDARI, M. Field and laboratory study of nitrogen mineralization dynamics in four Tunisian soils. **Journal of African Earth Sciences**, v. 154, n. 1, p. 101-110, 2019.

FU, Q.; YAN, J.; LI, H.; LI, T.; HOU, R.; LIU, D.; JI, Y. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles. **Geoderma**, v. 353, n. 1, p. 459-467, 2019.

GATIBONI, L. C., DA SILVA, W. C., MUMBACH, G. L.; SCHMITT, D. E.; IOCHIMS, D. A.; STAHL, J.; VARGAS, C. O. Use of exchangeable and non exchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 665-674, 2020.

GATIBONI, L. C.; VARGAS, C. O.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; STAHL, J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2017.

GAUDIO, N.; BELYAZID, S.; GENDRE, X.; MANSAT, A.; NICOLAS, M.; RIZZETTO, S.; SVERDRUO, H.; PROBST, A. Combined effect of atmospheric nitrogen deposition and climate change on temperate forest soil biogeochemistry: A modelling approach. **Ecological Modelling**, v. 306, n. 1. p. 24-34, 2015.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p. 255-93, 2002.

GONÇALVES, A. S.; MONTEIRO, M. T.; GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 651-658, 2002.

GONÇALVES, J. L. M.; RAIJ, B.; GONÇALVES, J. C. Florestais. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Boletim Técnico nº 100**. Campinas, IAC/FUNDAG. 2ª ed. rev. Atual. 1997. cap. 23, p. 245-258.

GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba IPEF, 2000. 427p.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 601-616, 2001.

GOULARTE, G. D. **Vulnerabilidade de perda de fósforo em sistemas conservacionistas de produção agrícola**. 171 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001.

HASHIMOTO, M. O. **Avaliação de diferentes técnicas de extração de nutrientes do solo e de plantas de *Pinus taeda* L.** 64 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2019**. Brasília, 2020 em: <<https://IBÁ.org/datafiles/publicacoes/relatorios/IBÁ-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações meteorológicas**. Brasília, 2020 em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php=estacoes/estacoesAutomaticas>> Acesso em: 28 mai. 2021.

JEDIDI, N.; VAN CLEEMPUT, O.; M'HIRI, A. Quantification des processus de minéralisation et d'organisation de l'azote dans un sol en présence d'amendements organiques. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, p. 85-91, 1995.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. Method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 1, p. 209-213, 1976.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1-13, 2010.

KELLER, A. B.; REED, S. C.; TOWNSEND, A. R.; CLEVELAND, C. C. Effects of canopy tree species on belowground biogeochemistry in a lowland wet tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 61-69, 2013.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W; Gieger, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebruder Borntrager, 1936. p. 1-44.

LEHMANN, J.; CRAVO, M. S.; MACÊDO, J. L. V.; MOREIRA, A.; SCHROTH, G. Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. **Plant Soil**, v. 237, p. 309-319, 2001.

LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R.; BRITO, G. S.; BAUTISTA, S. Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and *Eucalyptus* plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 1, p. 135397, 2020.

LUO, Z.; FENG, W.; LUO, Y.; BALDOCK, J.; WANG, E. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, v. 23, n. 10, p. 4430-4439, 2017.

MA, F.; JIA, X.; ZHOU, W.; ZHOU, L.; YU, D.; MENG, Y.; DAI, L. Soil nitrogen mineralization in a wind-disturbed area on Changbai Mountain after 30 years of vegetation restoration. **Acta Ecologica Sinica**, v. 37, n. 1, p. 265-271, 2017.

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LUCE, M. S.; HAMEL, C.; ANTOUN, H.; KARAM, A. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids. **Applied Soil Ecology**, v. 142, n. 1, p. 90-98, 2019.

MARQUES, R.; PIAZZA, G. E.; BLUM, H.; PINTO, C. B.; BIANCHIN, J. E.; DALMASO, C. A.; DICKOW, K. M. C. Contribuição da precipitação interna para o aporte de nutrientes em estágios sucessionais da floresta atlântica no paraná. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 4, p. 80-95, 2015.

MCKENZIE, J.; GOLDMAN, R. N. **The student edition of minitab for windows manual**. v.12, Softcover ed. Belmont: Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1999. 592p.

MILLER, A. E.; SCHIMEL, J. P.; MEIXNER, T.; SICKMAN, J. O.; MELAK, J. M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 2195-2204, 2005.

MORO, L.; GATIBONI, L. C.; SIMONETE, M. A.; CASSOL, P. C.; CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to N PK fertilization in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1181-1189, 2014.

MOSCATELLI, M. C.; DE ANGELIS, P.; LAGOMARSINO, A.; GREGO, S. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. **Forest Ecology Management**, v. 255, p. 447-454, 2008.

MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; CONSALTER, R.; REISSMANN, C. B. Nutrição e adubação da cultura de *Pinus*. In: **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. 1ª ed. Jaboticabal: FUNEP, 2014, v. 15, p. 383-426.

MÜLLER, F. **Floresta atlântica do sul do Brasil e diversidade microbiológica do solo sob essências florestais leguminosas**. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ODUM, E. P. Trends expected in stressed ecosystems. **BioScience**, v. 35, p. 419-422, 1985.

PEÑA, M. L. P.; MARQUES, R.; JAHNEL, M. C.; ANJOS, A. A. Respiração microbiana como indicador da qualidade do solo em ecossistema florestal. **Floresta**, v. 35, p. 117-126, 2005.

PIETIKÄINEN, J.; TIKKA, P.J.; VALKONEN, S.; ISOMÄKI, A.; FRITZE, H. Is the soil microbial community related to the basal area of trees in a Scots pine stand? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1832-1834, 2007.

PINTO, C. B. **Relação entre atributos edáficos, crescimento e nutrição de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil, sob influência da fertilização**. 139 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

PINTO, C. B.; MARQUES, R.; DALMASO, C. A.; KULMANN, M. S. S.; DELIBERALI, I.; SCHUMACHER, M. V.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C. Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in southern Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 544, p. 121162, 2023.

POLGLASE, P. J.; COMERFORD, M. B.; JOKELA, E. J. Leaching of inorganic from of southern pine plantations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 566-572, 1992.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. H.; LISBOA, H. M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecossistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floram**, v. 24, p. e00110314, 2017.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

RODRIGUEZ, D. R. O.; ANDRADE, G. C.; JURADO BELLOTE, A. F. J.; TOM AZELLOFILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p.179-189, 2018.

SAGLIKER, H. A.; CENKSEVEN, S.; KIZILDAG, N.; KOCAK, B.; OZDENIZ, E.; OZBEY, B. G.; BÖLÜKBASI, A.; KURT, L. Is parent material an important factor in soil carbon and nitrogen mineralization? **European Journal of Soil Biology**, v. 89, n. 1, p. 45-50, 2018.

SAMUELSON, L.; MATHEW, R.; STOKES, T.; FENG, Y.; AUBREY, D.; COLEMAN, M. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven years of irrigation and fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2431-2438, 2009.

SANTOS, E. D. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo, sob diferentes tipologias vegetais, na área de ocorrência da Floresta Ombrófila Densa, Antonina-PR.** 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SCHIMEL, J. P.; WEINTRAUB, M. N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, p. 549-563, 2003.

SHARPLEY, A. N.; WANG, X. Managing agricultural phosphorus for water quality: Lessons from the USA and China. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 26, n. 9, p. 1770-1782, 2014.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂).** Comunicado técnico. EMBRAPA. v. 99, Seropédica, 2007.

SILVA, R. S.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas

de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. Lavras: UFLA, 2010. 716p.

SOUZA, A. G. V.; SILVA, G. G.; BESERRA, G. A.; SOUZA, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, V. D.; ROCHA FILHO, C. T.; SERAFIM, M. N.; SANTOS, L. C. S.; SANTOS, T. E. B.; VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3673, 2021.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; SAGGAR, S.; HEDLEY, C. B.; DANDO, J.; SINGH, B. K.; LAMBIE, S. M. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1437-1449, 2007.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, E. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2015.

UZOHO, B. U.; IGBOJIONU, G. U. Carbohydrate distribution of particle size fractions of soils in relation to land-use types in Mbaise, Southeastern Nigeria. **Journal of Biology, Agriculture and Healthcare**, v. 4, p. 27-36, 2014.

WANG, C.; WAN, S.; XING, X.; ZHANG, L.; HAN, X. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 1101-1110, 2006.

YAGI, R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C. Mineralização potencial e líquida de nitrogênio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 385-394, 2009.

YAO, X.; ZHENG, W.; ZENG.; H.; WANG, W. Soil Microbial Attributes along a Chronosequence of Scots Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) Plantations in Northern China. **Pedosphere**, v. 30, n. 4, p. 60329, 2017.

ZHAO, N.; LI, X. G. Effects of aspect–vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. **Catena**, v. 155, n. 1, p. 1-9, 2017.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGEMBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, p. 117-161, 1997.

5 CAPÍTULO II: RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS, FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM PLANTAÇÕES JOVENS DE *Pinus taeda*, SOBRE DIFERENTES CLASSES DE SOLO DO SUL DO BRASIL

5.1 RESUMO

As plantações de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil têm apresentado alta produtividade nas últimas décadas. Porém, os ganhos de produtividade obtidos pela seleção e melhoramento genético têm se estabilizado atualmente. Assim, pesquisas sobre fatores edáficos e manejo silvicultural são realizadas visando aumentar a produtividade nos plantios de *Pinus*, além de melhorar a qualidade do solo. Dentre os atributos do solo, os microbiológicos são considerados bons indicadores por maior sensibilidade que os químicos e físicos. O objetivo foi avaliar as relações entre a atividade microbiológica e os parâmetros físicos e químicos de diferentes classes de solo sob plantações de *Pinus taeda* em crescimento inicial no sul do Brasil. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm em 5 sítios nos estados do Paraná e Santa Catarina. Os atributos microbiológicos do solo analisados foram: nitrogênio mineralizado acumulado (Nmin), carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO_2). Atributos físicos e químicos do solo também foram analisados. Os sítios 3, 4 e 5 apresentaram maiores valores médios dos atributos microbiológicos do solo, em relação aos sítios 1 e 2, fato possivelmente relacionado aos atributos edáficos do solo e ao manejo prévio com preparo mínimo em alguns sítios de *Pinus taeda*. O CBM e o RBS apresentaram melhor sensibilidade entre os atributos analisados, sendo que os atributos microbiológicos do solo tiveram fortes relações com outros atributos químicos e físicos, principalmente, teor de argila, relação C/N, K e pH. Os resultados sugerem que características sítio-específicas, como a classe de solo e histórico de uso do solo, influenciam nos atributos microbiológicos do solo em *Pinus taeda* durante o crescimento inicial no sul do Brasil.

Palavras-chave: Atividade microbiológica. Carbono da biomassa microbiana. Manejo silvicultural. Produtividade florestal.

5.2 ABSTRACT

The areas of *Pinus taeda* L. in southern Brazil have reached great improvements in average productivity over the last decades. However, the gains of productivity obtained by genetic selection and breeding have nowadays stabilized. Thus, research on edaphic factors and silvicultural management is performed aiming to increase productivity in *Pinus* plantations, besides maintaining soil quality. Among soil quality attributes the microbiological ones are considered good soil indicators because they are more sensitive than chemical and physical ones. In this study, we aimed to evaluate the relationship between microbial activity and the physical and chemical parameters of different soil taxonomy under young *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. Soil samples were collected at depths of 0-5 and 5-10 cm in plantations in the states of Paraná and Santa Catarina. The soil microbiological attributes analyzed were: potentially mineralizable nitrogen (PMN), microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), microbial basal respiration (MBR), and metabolic quotient (qCO_2). We also analyzed some physical and chemical soil parameters. Sites 3, 4, and 5 showed higher average values of soil microbiological attributes, compared to sites 1 and 2, a fact possibly related to edaphic soil attributes, and the previous management with minimal tillage in some sites. The MCB and MBR showed better sensitivity among the attributes, and the soil microbiological attributes had great relationships with other chemical and physical attributes, especially, clay content, C/N ratio, K, and pH. These results suggest that site-specific characteristics such as soil taxonomy or forest management influence soil microbiological attributes in *Pinus taeda* during initial growth in southern Brazil.

Keywords: Soil microbial activity. Microbial biomass carbon. Forest management. Forest productivity.

5.3 INTRODUÇÃO

Pinus taeda L. é uma das principais espécies florestais cultivadas em solos brasileiros e, atualmente, as plantações do gênero *Pinus* estão localizadas principalmente na região sul do Brasil, nos estados do Paraná (43%), Santa Catarina (24%) e Rio Grande do Sul (18%) (IBÁ, 2021; VASQUES et al., 2007). Práticas silviculturais combinadas ao melhoramento genético resultaram em áreas de *Pinus taeda* com alta produtividade no sul do Brasil (CONSALTER et al., 2021; PINTO JR et al., 2013; MORO et al., 2014). É reconhecido que fatores edafoclimáticos são importantes na limitação do crescimento de *Pinus* (DOBNER JR e CAMPOE, 2019; VOSE e ALLEN, 1988). No entanto, há uma lacuna de pesquisa na identificação das relações entre os atributos microbiológicos, físicos e químicos do solo e quais são mais adequados para refletir a qualidade do solo; e quais influenciam no crescimento de *Pinus taeda* no sul do Brasil (RODRIGUEZ et al., 2018; SANTOS e REICHERT, 2022).

Nas plantações de *Pinus*, a atividade microbiológica do solo depende da classe de solo, das condições ambientais e do tipo de manejo silvicultural (ALBAUGH et al., 2010; ALBAUGH et al., 2017; HEDO et al., 2015). Os processos pedogenéticos e o manejo do solo são responsáveis por muitos dos parâmetros edáficos (FOX et al., 2007; ZUCON et al., 2020). No longo prazo, esses fatores são decisivos para aumentar a produtividade e manter a sustentabilidade das plantações florestais (BOMFIM et al., 2020; BROUILLARD et al., 2017; SAMPIETRO et al., 2015).

Após um ciclo de exploração florestal, técnicas de espaçamento, aproveitamento da serapilheira do ciclo anterior e adição de fertilizantes são procedimentos que contribuem para manter o aporte de nutrientes ao solo e garantem a produtividade florestal ao longo prazo (KULMANN et al., 2021; TYREE et al., 2006; WARD et al., 2015). Algumas pesquisas avaliaram respostas as práticas de manejo com utilização de material genético melhorado, preparo mecânico do solo, controle de vegetação competitiva e técnicas de fertilização em plantações de *Pinus*; e encontraram resultados positivos na relação entre produtividade e atributos químicos do solo, melhorando significativamente o crescimento das espécies quando melhores práticas de preparo do solo foram adotadas (ALBAUGH et al., 2010; BATISTA et al., 2015; BORDERS e BAILEY, 2001). Outros estudos

observaram que plantações de *Pinus* com exploração sem a reposição de nutrientes podem apresentar déficit nutricional, resultando em baixa produtividade (GATIBONI et al., 2017; GATIBONI et al., 2020). Portanto, a avaliação dos atributos microbiológicos do solo e suas relações com outros atributos, como químicos e físicos, combinado com práticas de manejo silviculturais sítio-específicas em *Pinus taeda*, auxiliam na compreensão da dinâmica de nutrientes do solo (PINTO et al., 2023; SIXEL et al., 2015; TULLIO et al., 2022).

Estudos mostraram que a mineralização do nitrogênio e o carbono da biomassa microbiana são potenciais indicadores da qualidade do solo em sistemas florestais (LÓPEZ-POMA et al., 2020; LU et al., 2020; MOSCATELLI et al., 2008), pois, microrganismos são responsáveis pela mineralização dos elementos no solo e contribuem para a disponibilidade de nutrientes para as plantas (KHIARI et al., 2019; ROMEO et al., 2020). O histórico de uso do solo pode influenciar no crescimento de *Pinus taeda*, principalmente quando ocorre o aporte de resíduos florestais de ciclos anteriores (ADAM et al., 2021; VOGEL et al., 2018). A classe de solo também exerce influência sobre os atributos microbiológicos e o crescimento de *Pinus taeda*.

As relações entre os diferentes atributos edáficos, responsáveis pela qualidade do solo e pelo adequado crescimento das plantas, não estão totalmente estudados e avaliados em plantações de *Pinus taeda*, caracterizando uma lacuna nas pesquisas sobre esta espécie florestal no sul do Brasil.

A hipótese deste capítulo é que a atividade microbiológica do solo está correlacionada com alguns atributos físicos e químicos resultantes da classe de solo, bem como do histórico de uso do solo. Assim, nosso objetivo foi avaliar os atributos microbiológicos do solo sob plantações de *Pinus taeda* no sul do Brasil, bem como identificar as relações dos atributos microbiológicos com atributos químicos e físicos e com o histórico de uso do solo.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Área de estudo

Os sítios de pesquisa fazem parte do PPPIB, coordenado pelo IPEF. O clima predominante é o subtropical úmido, com estação seca no inverno e classificado por Köppen como Cfb (ALVARES et al., 2013).

O estudo foi realizado em cinco áreas experimentais com *Pinus taeda* plantadas em 2019 em relevo suave ondulado, nos estados de Santa Catarina e Paraná, na região sul do Brasil. As áreas foram selecionadas por causa de suas diferenças de classe de solo (TABELA 6) e diferenças nos atributos físicos e químicos do solo. Também houve diferenças quanto ao uso do solo antes das atuais plantações com *Pinus taeda*, e ao manejo silvicultural (TABELA 7).

TABELA 6 – Localização e classe de solo das áreas de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Áreas	Localização	Latitude	Longitude	Altitude	Solo
Sítio 1	Telêmaco Borba/Paraná	24°22'57.76" S	50°56'88.58" O	835 m	LATOSSOLO
Sítio 2	Lages/Santa Catarina	27°79'28.72" S	50°50'02.04" O	916 m	NITOSSOLO
Sítio 3	Caçador/Santa Catarina	26°74'86.67" S	51°07'18.11" O	1030 m	LATOSSOLO
Sítio 4	Vargem Bonita/Santa Catarina	26°55'31.71" S	51°47'36.18" O	1088 m	LATOSSOLO
Sítio 5	Campo Belo do Sul/Santa Catarina	28°00'29.00" S	50°51'20.00" O	956 m	CAMBISSOLO

TABELA 7 – Características do manejo silvicultural e uso do solo das áreas de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Áreas	Uso anterior do solo	Idade da colheita	Manejo do solo	Uso atual do solo (desde 2019)	Espaçamento (m x m)	Altura média (m)
Sítio 1	<i>Eucalyptus urophylla</i>	8 anos	Remoção de resíduos / Subsolação 60 cm	<i>Pinus taeda</i>	3,1 x 1,9	2,5
Sítio 2	<i>Pinus taeda</i>	22 anos	Remoção de resíduos / Subsolação 50 cm	<i>Pinus taeda</i>	2,4 x 2,6	3,2
Sítio 3	<i>Pinus taeda</i>	38 anos	Cultivo mínimo / Subsolação 60 cm	<i>Pinus taeda</i>	2,5 x 2,5	2,5
Sítio 4	<i>Pinus taeda</i>	15 anos	Remoção de resíduos / Subsolação 35 cm	<i>Pinus taeda</i>	2,5 x 2,0	2,4
Sítio 5	<i>Pinus taeda</i>	34 anos	Cultivo mínimo / Subsolação 45 cm	<i>Pinus taeda</i>	3,0 x 2,5	2,8

As parcelas de estudo foram estabelecidas com 128 árvores (8 fileiras x 16 árvores), incluindo uma borda dupla, resultando em uma área útil de 32 árvores por parcela e 672 árvores por sítio. Em cada sítio foram coletadas 21 amostras de solo por profundidade. A adubação inicial foi aplicada 180 dias após o plantio, com 20 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 33 kg ha⁻¹ de K₂O em pequenas covas distantes 10 cm das árvores. Também foram aplicados 675 kg ha⁻¹ de CaO e 150 kg ha⁻¹ de MgO nas entrelinhas, próximas às linhas das árvores. A adubação complementar (40 kg

ha⁻¹ de N e 67 kg ha⁻¹ de K₂O) foi aplicada 360 dias após o plantio na superfície do solo sob a copa das árvores.

5.4.2 Coleta e análises das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas 360 dias após a última aplicação de fertilizantes nas linhas e entrelinhas das plantações de *Pinus taeda*, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Em cada sítio, 21 amostras de solo foram coletadas para cada profundidade, resultando em um total de 42 amostras por sítio. As análises dos atributos microbiológicos foram realizadas conforme descrito nos itens 2.2 a 2.5.

A granulometria foi realizada de acordo com o método do densímetro de Bouyoucos (GEE; OR, 2002). Para análise química, as amostras de 0-5 e 5-10 cm foram analisadas conforme descrito no item 2.6.

5.4.3 Análise estatística

A análise de variância e o teste de Tukey ($P < 0,05$) para comparações de médias foram realizados usando o software Rstudio (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016) e o pacote estatístico 'ExpDes' no R versão 1.2.2. Correlações de Pearson e análises lineares foram usadas para avaliar as relações entre os atributos microbiológicos e outros atributos do solo. A análise de componentes principais (ACP) foi realizada com o programa MiniTab 19.

5.5 RESULTADOS

5.5.1 Atributos químicos e físicos

Em relação aos atributos químicos e físicos do solo, pequenas variações foram observadas entre as profundidades analisadas; as maiores diferenças ocorreram entre as plantações de *Pinus taeda* dos diferentes sítios (TABELA 8). O sítio 1 apresentou os menores valores de argila, carbono e macronutrientes na profundidade 0-5 cm. Os sítios 3, 4 e 5 foram as áreas com os maiores valores de argila e nutrientes. Apesar dos elevados teores de argila nestes sítios, os solos se

mostraram ácidos e distróficos, ou seja, com valores de pH baixos, elevada saturação por alumínio e baixa saturação por bases. E com baixos teores de fósforo.

TABELA 8 – Atributos químicos e granulometria do solo nas profundidades 0-5 e 5-10 cm das áreas de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

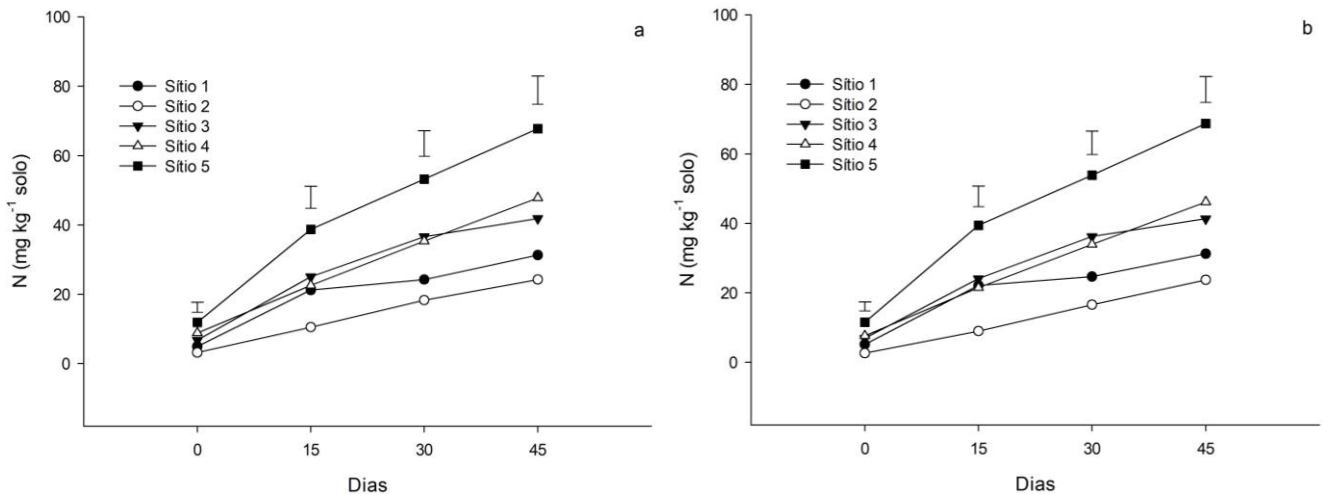
Sítios	Prof.	Argila	pH	C	N	P	K	Ca	Mg	Al	CTC	V	m
	cm	g kg ⁻¹	CaCl ₂	--g kg ⁻¹ --	mg kg ⁻¹	-----	-----	-----	cmol _c dm ⁻³ -----	-----	-----	-----%	-----
1	0-5	300	3,9	21,8	1,2	2,8	0,06	1,5	0,62	1,7	11,1	19,2	44,7
	5-10	313	4,0	19,8	1,2	6,0	0,05	1,5	0,51	1,6	11,1	18,8	43,6
2	0-5	625	4,1	32,0	1,9	3,9	0,13	2,7	1,12	1,7	14,4	27,1	30,5
	5-10	575	4,1	27,5	1,7	3,3	0,08	2,3	0,99	2,0	12,8	24,4	38,4
3	0-5	750	3,9	53,0	2,5	5,9	0,15	5,6	0,99	3,5	20,8	32,3	34,1
	5-10	713	3,9	44,5	2,1	4,8	0,13	5,1	0,88	3,5	20,3	30,4	36,1
4	0-5	714	4,4	42,9	2,4	3,4	0,14	1,3	0,42	3,7	17,1	11,0	66,4
	5-10	711	4,4	39,9	2,3	3,0	0,12	1,3	0,33	3,8	16,7	10,5	66,2
5	0-5	619	4,4	48,3	2,7	6,2	0,17	2,4	0,68	3,5	17,3	18,5	52,3
	5-10	623	4,4	41,4	2,4	4,7	0,10	2,0	0,47	3,8	17,3	15,0	59,4

pH (CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹); Al³⁺, Ca²⁺, e Mg²⁺ (extraído em KCl 1 mol L⁻¹); carbono total (C) e nitrogênio total (N) (determinado por combustão total); K⁺, P (extraído por Mehlich⁻¹); saturação por bases (V%); saturação por Al³⁺ (m%); capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (CTC).

5.5.2 Atributos microbiológicos do solo

Os valores de nitrogênio mineralizado acumulado mostraram um comportamento linear crescente, não alcançando a estabilização da mineralização durante este período de incubação. Não foram observadas diferenças entre as duas profundidades de solo analisadas. Os sítios 1 e 2 apresentaram os menores valores médios de N mineral acumulado, não mais que 32 mg N kg⁻¹ solo, enquanto os sítios 3, 4 e 5 apresentaram os maiores valores de N_{min}, entre 42 e 68 mg N kg⁻¹ solo (FIGURA 12a e FIGURA 12b), com o sítio 5 se destacando, com valores ainda mais elevados em relação aos sítios 3 e 4.

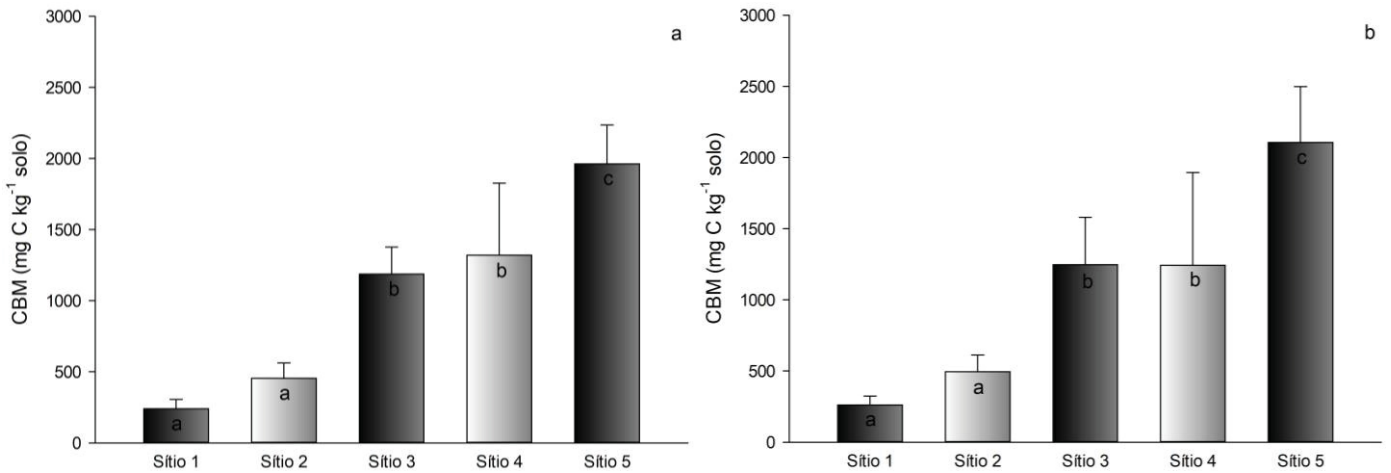
FIGURA 12 – Taxa de nitrogênio mineral acumulado nas amostras de solo de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade durante 45 dias de incubação anaeróbica, em sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.



A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os demais atributos microbiológicos do solo apresentaram o mesmo comportamento do N mineral acumulado, ou seja, os sítios 1 e 2 com menores valores médios para CBM, NBM e RBS, enquanto os sítios 3, 4 e 5 apresentaram os maiores valores médios destes atributos. Para a maioria das variáveis, as profundidades não foram significativamente diferentes de acordo com o teste de Tukey a 5% (FIGURAS 13 a 15). Para o CBM, os resultados foram significativamente diferentes entre os cinco sítios (FIGURA 13a e FIGURA 13b), com o sítio 5 apresentando os maiores valores (próximo a 2000 mg C kg⁻¹ solo), seguido pelos sítios 3 e 4 (entre 1000 e 1500 mg C kg⁻¹ solo), e os menores valores de CBM para os sítios 1 e 2 (abaixo de 500 mg C kg⁻¹ solo).

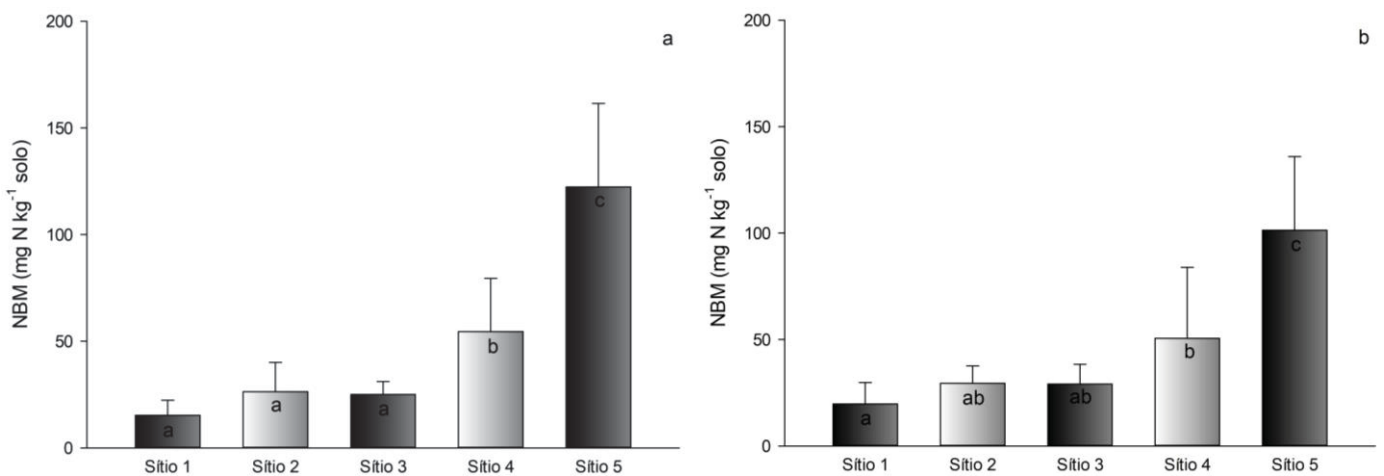
FIGURA 13 – Carbono da biomassa microbiana nas amostras de solo de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade, em sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.



Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A barra vertical representa o desvio padrão médio.

O NBM no sítio 5 foi superior ao do sítio 4 que, por sua vez, foi maior que nos sítios 3, 2 e 1. Os valores mais baixos variaram entre 25 e 29 mg N kg⁻¹ solo, e os maiores valores ficaram entre 51 e 123 mg N kg⁻¹ solo (FIGURA 14a e FIGURA 14b).

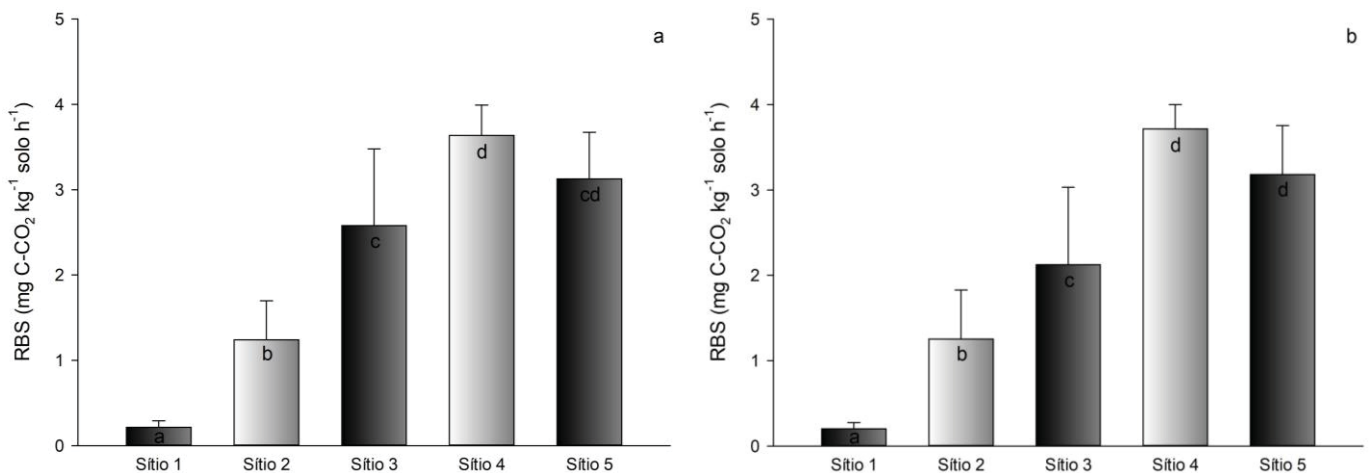
FIGURA 14 – Nitrogênio da biomassa microbiana nas amostras de solo de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade, em sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.



Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A barra vertical representa o desvio padrão médio.

Para a RBS, os resultados foram diferentes ao comparar os sítios de *Pinus taeda*. O sítio 4 apresentou o maior valor absoluto ($4 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$), mas estatisticamente igual aos dos sítios 3 e 5. O sítio 5 foi o segundo com maiores valores, seguido pelos sítios 3, 2 e 1 (FIGURA 15a e FIGURA 15b).

FIGURA 15 – Respiração basal do solo nas amostras de solo de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b) de profundidade, em sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.



Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A barra vertical representa o desvio padrão médio.

Os menores valores de $q\text{CO}_2$ foram observados para os sítios 1 e 5 (entre 0,77 e 1,63); os maiores para os sítios 2 e 4 (entre 2,84 e 3,91); e valor intermediário foi encontrado no sítio 3 (entre 1,84 e 2,32) (TABELA 9).

TABELA 9 – Valores médios da taxa de quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) nas profundidades de 0-5 cm (a) e 5-10 cm (b), em sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Sítio 1	Sítio 2	Sítio 3	Sítio 4	Sítio 5
Profundidade 0-5 cm				
$q\text{CO}_2$ (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)				
1,28 a	3,00 b	2,32 ab	3,24 b	1,63 a
Profundidade 5-10 cm				
$q\text{CO}_2$ (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)				
0,77 a	2,84 ab	1,84 ab	3,91 c	1,59 a

Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

5.5.3 Correlações entre os atributos do solo

Foi realizada correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos do solo e os atributos físicos e químicos com dados de todos os sítios de *Pinus taeda*. Foi observada correlação entre alguns atributos microbiológicos e características do solo, como argila, pH, C, N e potássio. Entretanto, não foram observadas correlações significativas dos valores de fósforo, cálcio e magnésio com os atributos microbiológicos (TABELA 10).

TABELA 10 – Correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos do solo Nmin (nitrogênio mineralizado acumulado), CBM (carbono da biomassa microbiana), NBM (nitrogênio da biomassa microbiana), RBS (respiração basal do solo), qCO_2 (quociente metabólico), e atributos químicos e granulométricos do solo, nas profundidades 0-5 e 5-10 cm, nas áreas de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Variáveis	Argila	pH ^a	C ^b	N ^c	P ^d	Ca ^e	Mg ^f	K ^g	V% ^h	m% ⁱ
Nmin	0,371	0,723*	0,698*	0,762*	0,316	-0,052	-0,472	0,487	-0,447	0,635*
CBM	0,514	0,725*	0,829*	0,894*	0,269	0,092	-0,306	0,637*	-0,316	0,555
NBM	0,299	0,817*	0,579	0,725*	0,235	-0,200	-0,342	0,474	0,136	0,166
RBS	0,826*	0,716*	0,872*	0,925*	-0,015	0,073	-0,333	0,734*	-0,380	0,657*
qCO_2	0,691*	0,378	0,349	0,412	-0,509	-0,077	0,114	0,422	-0,260	0,388

^a pH (CaCl₂), ^b carbono, ^c nitrogênio, ^d P (Melich⁻¹), ^e Ca e ^f Mg (KCl 1 mol L⁻¹), ^g K (Melich⁻¹), ^h saturação por bases (%), ⁱ saturação por Al³⁺ (%). Pares com valores (p>0,05) não há relação significativa entre as duas variáveis. * = significativo.

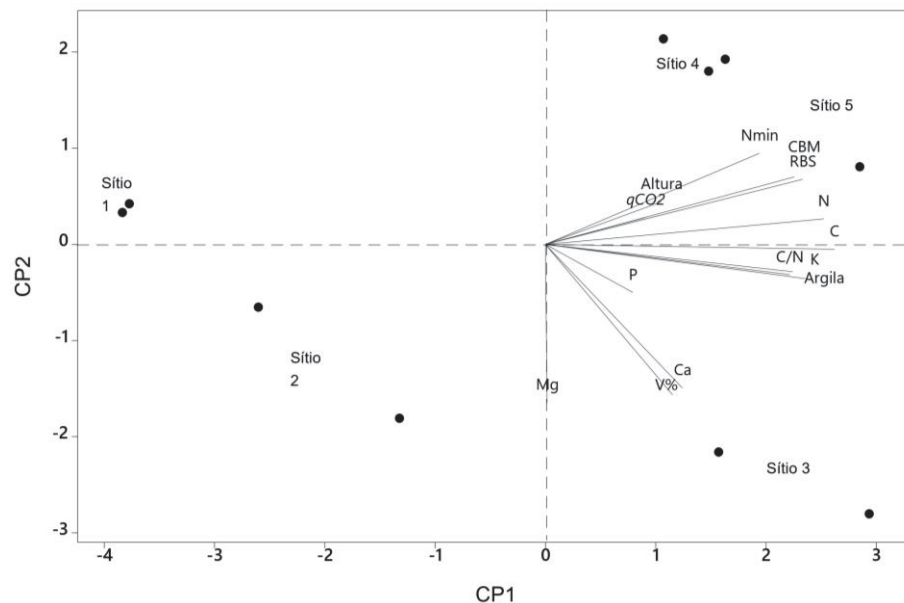
Pela análise de componentes principais, os componentes principais 1 e 2 explicaram 70% da variação dos dados. O CP1 explica 50% da variação total nos dados da matriz e o CP2 explica 20% dos dados. Para o CP1, os autovetores mais associados foram C, N, K, relação C/N, CBM, RBS e Nmin, resultando em uma associação direta. O CP2 foi influenciado por Nmin, CBM e RBS. (TABELA 11 e FIGURA 16).

TABELA 11 – Resultados da análise de componentes principais (ACP) dos sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil. A tabela apresenta os valores e escores obtidos para cada variável independente de cada fator.

	Componentes principais			
	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	6,9	3,2	2,6	0,6
Explicação (%)	0,5	0,2	0,2	0,0
Variáveis	Autovetores			
Nmin ¹	0,28	0,30	-0,23	0,16
CBM ²	0,32	0,22	-0,11	0,24
RBS ³	0,32	0,21	0,16	-0,04
qCO ₂ ⁴	0,13	0,09	0,55	-0,02
Altura ⁵	0,15	0,14	-0,52	-0,34
P ⁶	0,11	-0,16	-0,45	0,37
K ⁷	0,34	-0,11	0,13	0,22
Ca ⁸	0,18	-0,47	-0,09	-0,22
Mg ⁹	0,00	-0,52	0,08	0,36
C ¹⁰	0,38	-0,02	0,02	0,01
N ¹¹	0,36	0,08	0,08	0,23
Argila ¹²	0,32	-0,09	0,29	-0,00
C/N ¹³	0,32	-0,10	-0,11	-0,56
V% ¹⁴	0,17	-0,49	-0,06	-0,13

¹Nmin (nitrogênio mineralizado acumulado); ²CBM (carbono da biomassa microbiana); ³RBS (respiração basal do solo); ⁴qCO₂ (quociente metabólico); ⁵Altura da planta; ⁶P (fósforo); ⁷K (potássio); ⁸Ca (cálcio); ⁹Mg (magnésio); ¹⁰C (carbono); ¹¹N (nitrogênio); ¹² Argila; ¹³ C/N (carbono/nitrogênio); ¹⁴V% (saturação por bases).

FIGURA 16 – Análise de componentes principais (ACP) dos atributos químicos, físicos e microbiológicos dos sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil.



5.6 DISCUSSÃO

5.6.1 Atributos físicos, químicos e microbiológicos

De maneira geral, os atributos microbiológicos do solo não foram influenciados pela profundidade do solo (0-5 e 5-10 cm). Apesar de todos os sítios terem as mesmas espécies plantadas e com idades semelhantes, na ocasião deste estudo, as condições edafoclimáticas e o uso anterior do solo foram bastante diferentes entre os sítios (TABELA 7). As diferenças identificadas para os atributos microbiológicos no solo foram relacionadas principalmente às condições sítios-específicas de cada área de *Pinus taeda*, como tem sido observado em vários estudos relatados a seguir. Alguns trabalhos observaram que os efeitos nos atributos microbiológicos do solo não foram relacionados às espécies plantadas (SAMUELSON et al., 2004; SAMUELSON et al.; 2009), mas sim às condições edáficas resultantes do histórico de uso do solo e ao manejo do sistema florestal de cada sítio (TSCHIEDER et al., 2012; WARD et al., 2015).

O sítio 1, localizado no Paraná, estava sobre LATOSSOLO, desenvolvido sobre material geológico que resultou em solo mais arenoso; e teve cultivo anterior com eucalipto, com remoção total dos resíduos antes do plantio do *P. taeda*. Como

resultado, o solo apresentou-se ácido, distrófico e com os mais baixos teores de carbono no solo comparativamente aos outros sítios, o que se explica por ser um solo mais intemperizado e pela prática de remoção dos resíduos. Estas características foram responsáveis pelos menores valores encontrados para os atributos microbiológicos do solo. A qualidade da matéria orgânica remanescente no solo é fator que influencia os atributos microbiológicos do solo (HARRISON et al., 2014; FINE et al., 2018).

O sítio 2, sobre NITOSSOLO, apresentou teores de carbono um pouco superior ao do sítio 1, mas inferiores àqueles dos sítios 3, 4 e 5. Com o segundo menor valor para os atributos microbiológicos, também foi o segundo mais baixo em relação aos teores de C, N, P, K, Ca e Mg no solo. Durante a colheita do plantio anterior de *Pinus taeda*, a maior parte dos resíduos vegetais também foi retirada da área, o que poderia explicar também os baixos valores neste sítio para os atributos microbiológicos avaliados. Apesar de teores de argila elevados, esta classe de solos costuma apresentar densidade do solo elevada, o que poderia prejudicar a atividade biológica (SAMUELSON et al.; 2009).

Os sítios 3 e 4, sobre LATOSSOLO apresentaram teores de carbono equivalentes aos do sítio 5, mas ficaram com valores de N_{min} acumulado e CBM inferiores, o que talvez se explique pela maior altitude destes sítios e também por serem solos mais intemperizados com argilas de menor atividade, o que poderia limitar, em parte, a atividade microbiológica no solo.

O sítio 5, sobre CAMBISSOLO, apresentou valores elevados para argila, C, N, P, K, Ca e Mg, provavelmente em decorrência do uso prévio com *Pinus taeda* durante 34 anos e com a manutenção da maior parte dos resíduos da colheita no solo, favorecendo o aporte de biomassa e nutrientes ao solo (GONÇALVES et al., 2001). A combinação desses fatores pode explicar os maiores valores dos atributos microbiológicos neste sítio.

A acidez elevada em praticamente todos os sítios não prejudicou a atividade microbiológica pois os valores de CBM observados são bastante elevados comparativamente a outros estudos em florestas (TÚLIO et al., 2022); e mesmo comparativamente a estudos em áreas com solos eutróficos (PRIMIERI et al., 2017; SOUZA et al., 2021). A elevada acidez se explica pelos elevados teores de matéria orgânica (carbono) dos solos; e pelo longo histórico florestal, onde a correção da acidez do solo não é prática corrente.

Por outro lado, algumas pesquisas demonstraram que a adição de Ca e Mg em plantações de *Pinus taeda* pode aumentar o crescimento da floresta (CONSALTER et al., 2020; SANTOS et al., 2020). Além disso, o fornecimento de cálcio e magnésio também auxilia na microbiota do solo e no fornecimento de nitrogênio mineral ao *Pinus taeda* (YUN et al., 2016). A calagem, além de regular a acidez do solo e aumentar a saturação por bases, também reduz a saturação por alumínio, o que pode ser um fator importante para a atividade microbológica do solo (ADAM et al., 2021; ESPÍNDOLA et al., 2018).

A relação C/N é outro fator importante no controle da taxa de mineralização e das relações com diferentes grupos de microrganismos (JOSEPH et al., 2017; KUZUYAKOV et al., 2019). Por meio da relação C/N é possível estimar a taxa de mineralização, inclusive quantificando a retenção de nitrogênio mineral no solo, além de verificar o aumento da matéria orgânica do solo, o que contribui para promover a biomassa microbiana (VELOSO et al., 2019; ESPÍNDOLA et al., 2018). Manirakiza et al. (2019) avaliaram as razões de mineralização de nitrogênio no solo com a aplicação de fertilizante mineral e orgânico e identificaram que a fertilização melhorou a relação C/N para níveis adequados para mineralização, inclusive aumentando a retenção de nitrato e matéria orgânica do solo, promovendo biomassa microbiana (CHEN et al., 2010; LEE e JOSE, 2003).

Biesek (2012) estudou atributos microbiológicos em áreas de cultivo, pastagem manejada, campo nativo e Floresta Ombrófila Mista e constatou que os atributos microbiológicos estavam melhor relacionados aos estoques de carbono e nitrogênio nas áreas de floresta e de campo nativo, mas se relacionou melhor com os teores de nutrientes nas áreas agrícolas, com menores teores de C no solo.

Com exceção da argila, os teores de C, N, P, K, Ca e Mg na superfície do solo estão intimamente relacionados com a qualidade da matéria orgânica do solo, e a melhor qualidade microbológica do solo ocorre quando o manejo florestal é feito com técnicas de fertilidade/silvicultura que melhoram a produtividade das culturas por meio da incorporação de matéria orgânica ao solo (LÓPEZ-POMA et al., 2020; SCHUMACHER et al., 2008).

5.6.2 Relações entre os atributos do solo

Os sítios com os maiores valores de pH do solo foram os que mostraram valores mais elevados para CBM, RBS e Nmin, apesar das pequenas variações entre os valores mais baixos e os mais elevados (3,9 a 4,4). O pH do solo é uma variável importante na regulação da diversidade microbiana e do processo de mineralização de nutrientes (GONÇALVES et al., 2007; PREVEDELLO et al., 2013).

Porém, esta não é a única variável química do solo que pode influenciar os atributos microbiológicos. Outros estudos sobre a influência dos atributos microbiológicos em sistemas florestais encontraram correlações e interações positivas de outras variáveis químicas e físicas com a microbiologia do solo (PRIMIERY et al., 2017; SOUZA et al., 2021). O CBM, em muitos casos, mostra estreita relação com o carbono do solo, e isso está ligado a outros fatores do solo, como a umidade, que contribui para a mineralização da matéria orgânica do solo (BARGALI et al., 2018).

Isto também foi observado nos resultados do presente estudo, com correlações positivas entre os atributos microbiológicos, o carbono do solo e o teor de argila. Os atributos CBM e RBS apresentaram as melhores correlações com a relação C/N. Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos (MILLER et al., 2005; SAMUELSON et al., 2009). Samuelson et al. (2009) mostraram que a RBS e o CBM podem ser indicadores eficientes da microbiota do solo em plantações de *Pinus taeda*. Neste estudo, a RBS mostrou uma estreita relação com o teor de argila e foi o atributo microbiológico mais sensível dessa correlação. Valores baixos de RBS podem indicar menor disponibilidade de substrato para microrganismos do solo (VELOSO et al., 2019; YAO et al., 2020). Portanto, é interessante ter uma taxa de RBS equilibrada nos solos para manter a qualidade do solo.

Os sítios 1 e 2 apresentaram menores valores médios dos atributos microbiológicos do solo e menores relações entre os atributos do solo. Enquanto os sítios 3, 4 e 5 mostraram os maiores valores médios de atributos microbiológicos e as correlações mais estreitas. Mas os sítios 4 e 5 foram os mais associados aos atributos do solo: Nmin, CBM, RBS, carbono e nitrogênio total, enquanto o sítio 3 foi mais relacionado com as bases do solo, como K e Ca.

O qCO_2 mostrou correlação positiva com o teor de argila dos sítios. Valores semelhantes de qCO_2 para plantações de *Pinus*, mas de diferentes idades e em diferentes profundidades do solo, foram encontrados em outros estudos (JOERGENSEN e EMMERLING, 2006; TULIO et al., 2022). Tulio et al. (2022) não encontraram relações entre o quociente metabólico e atributos químicos e físicos em plantações de *Pinus taeda*. No entanto, em solo do norte da China sob *Pinus sylvestris*, YAO et al. (2020) encontraram uma forte correlação entre qCO_2 e o teor de água no solo; e o atributo ajudou a entender a dinâmica da MOS das florestas, principalmente relacionando as características físicas do solo (YAO et al., 2020). Por ser um atributo fisiológico, o quociente metabólico é um atributo que requer alguns cuidados na interpretação de resultados (ANDERSON e DOMSCH, 2010).

5.7 CONCLUSÕES

Os resultados indicam que os fatores edáficos atuam de forma sítio-específicas nos atributos microbiológicos do solo, com influência direta da classe de solo. O uso anterior do solo e o manejo florestal (sistema de colheita e preparo do solo) apresentaram efeito relevante nos resultados.

CBM e RBS foram os atributos microbiológicos do solo mais sensíveis, mostrando uma estreita relação com teor de argila, pH, relação C/N e K no solo.

Os atributos microbiológicos do solo são sensíveis às práticas de manejo, sugerindo a utilização dos mesmos como indicadores para avaliar mudanças na qualidade do solo.

5.8 REFERÊNCIAS

ADAM, W. M.; RODRIGUES, V. S.; MAGRI, E.; MOTTA, A. C. V.; ZAMBON, L. M.; LIMA, R. L. D. Mid-rotation fertilization and liming of *Pinus taeda*: growth, litter, fine root mass, and elemental composition. **iForest**. v. 14, p. 195-202, 2021.

ALBAUGH, J. M.; BLEVINS, L.; ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; STAPE, J. L.; RUBILAR, R. A. Characterization of Foliar Macro- and Micronutrient Concentrations and Ratios in Loblolly Pine Plantations in the Southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 34, n. 2, p. 53-64, 2010.

ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; RUBILAR, R. A.; COOK, R. L.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Post-thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 207-216, 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's Climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728. 2013.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2039-2043, 2010.

BARGALI, M.; MANRAL, V.; PADALIA, K.; BARGALI, S. S.; UPADHYAY, V. P. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India. **Catena**, v. 171, p. 125-135, 2018.

BATISTA, A. H.; MOTTA, A. C. V.; REISSMANN, C. B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I. L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 1, p. 117-125, Maringá, 2015.

BIESEK, M. F. **Indicadores químicos e microbiológicos da qualidade do solo em agrossistemas e sistemas nativos na região dos campos gerais, Castro-PR.** 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BOMFIM, B.; SILVA, L. C. R.; PEREIRA, R. S.; GATTO, A.; EMMERT, F.; HIGUCHI, N. Litter and soil biogeochemical parameters as indicators of sustainable logging in Central Amazonia. **Science of the Total Environment**, v. 714, p. 136780, 2020.

BORDERS, B. E.; BAILEY, R. L. Loblolly pine: Pushing the limits of growth. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 25, n. 2, p. 69-74, 2001.

BROUILLARD, B. M.; MIKKELSON, K. M.; BOKMAN, C. M.; BERRYMAN, E. M.; SHARP, J. O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 114, p. 309-318, 2017.

CHEN, B.; LIU, S.; GE, J.; CHU, J. Annual and seasonal variations of Q10 soil respiration in the sub-alpine forests of the eastern Qinghai-Tibet plateau, China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1735-1742, 2010.

CONSALTER, R.; BARBOSA, J. Z.; PRIOR, S. A.; VEZZANI, F. M.; BASSACO, M. V. M.; PEDREIRA, G. Q.; MOTTA, A. C. V. Mid-rotation fertilization and liming effects on nutrient dynamics of *Pinus taeda* L. in subtropical Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 19-35, 2020.

CONSALTER, R.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; VEZZANI, F. M.; RUBILAR, R. A.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; BASSACO, M. V. M. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 1095-1112, 2021.

DOBNER JR, M.; CAMPOE, O. C. Meteorological effects on 30-years-grown *Pinus taeda* under a gradient of crown thinning intensities in southern Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 453, p. 117624, 2019.

ESPÍNDOLA, S. P.; BOBUL'SKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Impact of nitrogen additions on soil microbial respiration and temperature sensitivity in native and agricultural ecosystems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Biology**, v. 75, n. 1, p. 120-127, 2018.

FINE, A. K.; SCHMIDT, M. P.; MARTÍNEZ, C. E. Nitrogen-rich compounds constitute an increasing proportion of organic matter with depth in Oi-Oe-Oa-A horizons of temperate forests. **Geoderma**, v. 323, n. 1, p. 1-12, 2018.

FOX, T. R.; ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J.; RUBILAR, R. A.; CARLSON, C. A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 31, p. 5-11, 2007.

GATIBONI, L. C., DA SILVA, W. C., MUMBACH, G. L.; SCHMITT, D. E.; IOCHIMS, D. A.; STAHL, J.; VARGAS, C. O. Use of exchangeable and non exchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 665-674, 2020.

GATIBONI, L. C.; VARGAS, C. O.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; STAHL, J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2017.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p. 255-93, 2002.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 601-616, 2001.

GONÇALVES, J. L. M.; WICHERT, M. C. P.; GAVA, J. L.; MASETTO, A. V.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SERRANO, M. I. P.; MELLO, S. L. M. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. **Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 69, p. 95-102, 2007.

HARRISON-KIRK, T.; BEARE, M. H.; MEENKEN, E. D.; CONDRON, L. M. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, n. 1, p. 50-60, 2014.

HEDO, J.; LUCAS-BORJA, M. E.; BAENA, C. W.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; HERAS, J. L. Experimental site and season over-control the effect of *Pinus halepensis* in microbiological properties of soils under semiarid and dry conditions. **Journal of Arid Environment**, v. 116, p. 44-52, 2015.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2019**. Brasília, 2020 em: <<https://IBÁ.org/datafiles/publicacoes/relatorios/IBÁ-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

JOERGENSEN, R. G.; EMMERLING, C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 295-309, 2006.

JOSEPH, C. A.; KHIARI, L.; GALLICHAND, J.; BOUSLAMA, S. Classification and assessment models of first year byproducts nitrogen plant-availability from literature data. **Science of the Total Environment**, v. 586, n. 1, p. 976-984, 2017.

KHIARI, Z.; KALUTHOTA, S.; SAVIDOV, N. Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. **Aquaculture**, v. 500, n. 1, p. 492-499, 2019.

KULMANN, M. S. S.; DICK, G.; SCHUMACHER, M. V. Litterfall and Accumulated Nutrients in *Pinus taeda* Plantation and Native Forest in Southern Brazil. **Forests**, v. 12, p. 1791, 2021.

KUZYAKOV, Y.; HORWATH, W. R.; DORODNIKOV, M.; BLAGODATSKAYA, E. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 128, n. 1, p. 66-78, 2019.

LEE, K. H.; JOSE, S. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. **Forest Ecology Management**, v. 185, n. 3, p. 263-273, 2003.

LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R.; BRITO, G. S.; BAUTISTA, S. Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and Eucalyptus plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 1, p. 135397, 2020.

LU, T.; WANG, Y.; ZHU, H.; WEI, X.; SHAO, M. Drying-wetting cycles consistently increase net nitrogen mineralization in 25 agricultural soils across intensity and number of drying-wetting cycles. **Science of the Total Environment**, v. 710, n. 1, p. 135574, 2020.

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LUCE, M. S.; HAMEL, C.; ANTOUN, H.; KARAM, A. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids. **Applied Soil Ecology**, v. 142, n. 1, p. 90-98, 2019.

MILLER, A. E.; SCHIMEL, J. P.; MEIXNER, T.; SICKMAN, J. O.; MELAK, J. M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 2195-2204, 2005.

MORO, L.; GATIBONI, L. C.; SIMONETE, M. A.; CASSOL, P. C.; CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to N PK fertilization in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1181-1189, 2014.

MOSCATELLI, M. C.; DE ANGELIS, P.; LAGOMARSINO, A.; GREGO, S. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. **Forest Ecology Management**, v. 255, p. 447-454, 2008.

NAYLOR, D.; MCCLURE, R.; JANSSON, J. Trends in Microbial Community Composition and Function by Soil Depth. **Advances in Soil Microbiome**, v. 10, n. 3, p. 540, 2022.

PINTO JR, J. E.; SANTOS, P. E. T.; AGUIAR, A. V.; KALIL FILHO, A. N.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; STURION, J. A.; RESENDE, M. D. V.; SOUSA, V. A.

Melhoramento genético de espécies arbóreas na Embrapa Florestas: uma visão histórica. Colombo: Embrapa Florestas, Colombo, 2013.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 129-38, 2013.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. H.; LISBOA, H. M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecossistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floram**, v. 24, p. e00110314, 2017.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

RODRIGUEZ, D. R. O.; ANDRADE, G. C.; JURADO BELLOTE, A. F. J.; TOM AZELLOFILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p.179-189, 2018.

ROMEO, F.; SETTINERI, G.; SIDARI, M.; MALLAMACI, C.; MUSCOLO, A. Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. **Forest Ecology and Management**, v. 465, p. 118106, 2020.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 239-248, 2015.

SAMUELSON, L.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, v. 192, p. 59-70, 2004.

SAMUELSON, L.; MATHEW, R.; STOKES, T.; FENG, Y.; AUBREY, D.; COLEMAN, M. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven years of irrigation and fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2431-2438, 2009.

SANTOS, E.; MARTINS, K. G.; MARQUES, R. Mineralização do nitrogênio no solo sob Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, em Paranaguá, PR-Brasil. **Nativa**, v. 8, n. 4, p. 558-566, 2020.

SANTOS, K. F.; REICHERT, J. M. Best tillage practices for eucalyptus growth and productivity: A review on the Brazilian experience. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0210091, 2022.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Litter production and nutrients transfer in a second rotation area with *Pinus taeda* L. forest in Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 4, p. 471-480, 2008.

SIXEL, R. M. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; STAHL, J.; MOREIRA, A. M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1416-1427, 2015.

SOUZA, A. G. V.; SILVA, G. G.; BESERRA, G. A.; SOUZA, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, V. D.; ROCHA FILHO, C. T.; SERAFIM, M. N.; SANTOS, L. C. S.; SANTOS, T. E. B.; VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3673, 2021.

TRYEE, M. C.; SEILER, J. R.; AUST, W. M.; SAMPSON, D. A.; FOX, T. R. Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO₂ efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain. **Forest Ecology and Management**, v. 234, p. 363-369, 2006.

TSCHIEDER, E. F.; FERNÁNDEZ, M. E.; SCHLICHTER, T. M.; PINAZO, M. A.; CRECHI, E. H. Influence of growth dominance and individual tree growth efficiency on *Pinus taeda* stand growth. A contribution to the debate about why stands productivity declines. **Forest Ecology and Management**, v. 277, p. 116-123, 2012.

TULIO, R. H.; RACHWAL, M. F. G.; ZANATTA, J. A.; SILVA, K.; KASCHUK, G. Physical, chemical and microbiological soil attributes influence soil greenhouse gases fluxes in Atlantic Forest and pine (*Pinus taeda*) plantations in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 39, p. 183-197, 2022.

VASQUES, A. G.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 1-6, 2007.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, n. 1, p. 139-146, 2019.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; NEVEZ, J. L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK. **Enflo**, v. 6, n. 3, p. 59-70, 2018.

VOSE, J. M.; ALLEN, H. L. Leaf area, stemwood growth and nutrition relationships in loblolly pine. **Forest Science**, v. 34, p. 547-563, 1988.

WARD, E. J.; DOMEK, J. C.; LAVINER, M. A.; FOX, T. R.; SUN, G.; MCNULTY, S.; KING, J.; NOORMETS, A. Fertilization intensifies drought stress: Water use and stomatal conductance of *Pinus taeda* in a mid-rotation fertilization and throughfall reduction experiment. **Forest Ecology and Management**, v. 355, p. 72-82, 2015.

YAO, X.; ZHENG, W.; ZENG, H.; WANG, W. Soil Microbial Attributes along a Chronosequence of Scots Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) Plantations in Northern China. **Pedosphere**, v. 30, n. 4, p. 603-29, 2017.

YUN, Y.; WANG, H.; MAN, B.; XIANG, X.; ZHOU, J.; QIU, X.; DUAN, Y.; ENGEL, A.S. The Relationship between PH and Bacterial Communities in a Single Karst Ecosystem and Its Implication for Soil Acidification. **Frontiers Microbiology**, v. 7, p. 1955, 2016.

ZUCON, A.; DOMINSCHEK, R.; MOTTA, A. C. V. Can fertilization and liming affect the amount of litter and roots on *Pinus taeda* forest floor? **Scientia Forestalis**, v. 48 n. 128, p. e3193, 2020.

6 CAPÍTULO III: RELAÇÕES SOLO-PLANTA EM DIFERENTES ECOSISTEMAS TERRESTRES COM FOCO NOS ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO

6.1 RESUMO

O Brasil é um país megadiverso, com ecossistemas terrestres distintos em função das diferentes situações edafoclimáticas existentes. Alguns atributos microbiológicos do solo são reconhecidos por sua sensibilidade às mudanças ambientais e podem ser usados como indicadores de alterações nestes ecossistemas. Porém, pouco se sabe sobre valores que possam ser considerados como representativos nos ecossistemas em diferentes estados de conservação. Além disso, poucos trabalhos buscaram identificar as relações dos atributos microbiológicos com outros atributos físicos e químicos do solo e com atributos da vegetação. Os objetivos deste estudo foram: i) identificar as relações entre os atributos microbiológicos do solo e os parâmetros físicos e químicos do solo; e com atributos da vegetação, em diferentes ecossistemas terrestres brasileiros (Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana, Floresta Ombrófila Mista Altomontana, Campos de Altitude, Floresta Estacional Decidual e áreas de Savana florestada e arborizada do Cerrado); ii) avaliar comparativamente os atributos microbiológicos do solo quanto a sua sensibilidade em caracterizar diferentes ecossistemas e/ou indicar mudanças no sistema solo-planta. Foram realizadas as análises de granulometria e fertilidade química do solo e os parâmetros microbiológicos: mineralização do nitrogênio (N_{min}), carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO_2). Os resultados mostraram que os atributos microbiológicos do solo são influenciados pelas classes de solo e fisionomias vegetais de maneira particular, de acordo com cada ecossistema. Na Floresta Ombrófila Densa, a RBS foi eficiente na diferenciação das formações florestais entre florestas de Terras Baixas, Submontana e Montana. Na Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, o CBM e a RBS foram os atributos mais sensíveis em explicar as formações vegetais, enquanto no Cerrado, foram os atributos microbiológicos N_{min}, CBM, NBM e RBS. Pelas análises de correlação foi observado que nas áreas de Cerrado os atributos edáficos e da vegetação mostram estreita correlação com os atributos microbiológicos do solo. Já, nas áreas de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, houve pouca variação nos atributos microbiológicos em função das fisionomias vegetais.

Palavras-chave: Atividade microbiológica. Floresta Ombrófila Densa. Floresta Ombrófila Mista. Cerrado. Campos de Altitude.

6.2 ABSTRACT

Brazil is a megadiverse country, with distinct terrestrial ecosystems according to the differences in soil and climate situations. Some microbiological soil attributes are recognized for their sensitivity to environmental changes and can be used as indicators of changes in these ecosystems. However, little is known about values that can be considered representative of ecosystems in different states of conservation. Furthermore, few studies have sought to identify the relationships of microbiological attributes with other physical and chemical attributes of the soil and vegetation attributes. The objectives of this study were: i) to identify the relationships between the microbiological attributes of the soil and the physical and chemical parameters of the soil; and with vegetation attributes, in different Brazilian terrestrial ecosystems (Lowland Dense Ombrophylous Forest, Submontane, and Montana Dense Ombrophylous Forest, Altomontane Mixed Ombrophylous Forest, Altitude Fields, Deciduous Seasonal Forest and forested and wooded Savanna areas of the Cerrado); ii) comparatively evaluate the microbiological attributes of the soil regarding their sensitivity in characterizing different ecosystems and/or indicating changes in the soil-plant system. Analyses of soil particle size and chemical fertility and microbiological parameters were carried out: nitrogen mineralization (Nmin), microbial biomass carbon (CBM), microbial biomass nitrogen (NBM), basal soil respiration (RBS) and metabolic quotient (qCO_2). The results showed that the microbiological attributes of the soil are influenced by soil classes and plant physiognomies in a particular way, according to each ecosystem. In the Dense Ombrophylous Forest, RBS was efficient in differentiating forest formations between the Lowland, Submontane, and Montana forests. In the Mixed Ombrophylous Forest and Campos de Altitude, CBM and RBS were the most sensitive attributes in explaining plant formations, while in the Cerrado, the microbiological attributes were Nmin, CBM, NBM, and RBS. Through correlation analysis, it was observed that in Cerrado areas, edaphic and vegetation attributes show a close correlation with the microbiological attributes of the soil. In the areas of Dense Ombrophylous Forest, Mixed Ombrophylous Forest, and Altitude Fields, there was little variation in microbiological attributes depending on plant physiognomies.

Palavras-chave: Microbiological activity. Dense ombrophylous forest. Mixed ombrophylous forest. Cerrado. Altitude Fields.

6.3 INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica e o Cerrado representam aproximadamente 37% da área total do Brasil (IBGE, 2012). Dentre as principais fisionomias vegetais encontradas nestes ecossistemas, destacam-se a Floresta Ombrófila Densa, a Floresta Ombrófila Mista e os Campos de Altitude no bioma Mata Atlântica (BLANCO, 2021); e a Savana Arborizada, a Savana Florestada e a Floresta Estacional Decidual no bioma Cerrado (LIMA, 2018). Nas últimas décadas as formações vegetais nativas sofreram grandes impactos nestes ecossistemas, principalmente devido à ação antrópica (GRECCHI et al., 2015; THOMAZINI et al., 2015). A perda da biodiversidade preocupa vários pesquisadores; e para mitigar tais impactos, monitorar e estudar áreas suscetíveis é de suma importância para nortear as políticas de conservação e sustentabilidade dos recursos naturais (VALERA et al., 2016; RITZ et al., 2009).

Os ecossistemas terrestres abrigam grande quantidade de microrganismos no solo (CROWTHER et al., 2019); e a atividade microbiológica é reconhecida como potencial indicadora de impactos e mudanças no ecossistema, devido à ciclagem de nutrientes, interações planta-microrganismos e à biodegradação de compostos orgânicos (JANSSON e HOFMOCKEL, 2020).

Diversos trabalhos demonstraram que os atributos microbiológicos do solo são bons indicadores para compreensão do uso do solo, pois a atividade microbiológica se relaciona diretamente com a biodiversidade e os processos ecossistêmicos (BOMFIM et al., 2020; CARDOSO et al., 2009; CHEN et al., 2023). Estudos sobre como as relações solo-planta nos ecossistemas influenciam os atributos microbiológicos do solo, contribuem para identificar possíveis alterações relativas às mudanças no uso do solo, conforme as particularidades de cada ecossistema (BRITO et al., 2019; SPERA et al., 2016; ZILLI et al., 2003).

Vários são os atributos microbiológicos passíveis de serem bons indicadores. Entre eles está o N mineralizável no solo que pode ser estimado por meio de ensaios de incubação aeróbica e anaeróbica em laboratório. Resultados que refletem as condições reais de campo têm sido obtidos por vários autores, a partir de experimentos com incubação aeróbica e anaeróbica de amostras de solo (GONÇALVES et al., 2002; LÓPEZ-POMA et al., 2020; YAGI et al., 2009). O método de incubação em condições anaeróbicas à temperatura entre 25 e 35 °C é amplamente utilizado em experimentos de curta duração (LI et al., 2003; YAGI et al.,

2009); e demonstra grande potencial preditivo, por exemplo, para a estimativa do nitrogênio potencialmente mineralizável e da biomassa microbiana do solo (CHEN et al., 2020; GONÇALVES et al., 2001). Ensaios de mineralização de nitrogênio são realizados com o intuito de investigar a dinâmica do nitrogênio no solo (IBRAHIM et al., 2020), e há casos de estudos com incubação anaeróbica de curta duração em que a mineralização e a disponibilidade de nitrogênio são refletidas a longo prazo nos ecossistemas (LU et al., 2020; WU et al., 2020).

Outros atributos microbiológicos também têm se mostrado eficientes na identificação de mudanças nos ecossistemas (ESPÍNDOLA et al., 2018; GUHR et al., 2016), como, por exemplo, a respiração microbiana basal e o carbono contido na biomassa dos microrganismos (NOVAK et al., 2018; ROMEO et al., 2020). Atributos como a biomassa microbiana e a respiração basal do solo estão mais relacionados ao fluxo de carbono no solo (BÜNEMANN et al., 2018) e refletem a entrada e saída deste elemento, bem como, a sua interação com a qualidade nutricional da matéria orgânica do solo e os fatores de decomposição da biomassa vegetal (LIMA et al., 2013; SOUZA et al., 2021).

Sabe-se que os atributos microbiológicos do solo são influenciados pelos fatores edáficos, pela vegetação e pelo manejo do solo; mas também é sabido que a sensibilidade dos atributos microbiológicos varia de acordo com o ambiente (RITZ et al., 2009). Em muitos estudos, os atributos microbiológicos foram mais alterados pelos sistemas de manejo, comparados aos atributos químicos e físicos do solo, em função da relação direta com a qualidade da matéria orgânica do solo (CARNEIRO et al., 2009; DRIDI e GUEDDARI, 2019; SOUZA et al., 2021). Em seus estudos sobre a mineralização do nitrogênio com incubação de curta duração, López-Poma et al. (2020) alertaram que, em áreas de Cerrado convertidas para pastagem, a mudança resultou no esgotamento do nitrogênio no solo com o manejo intensivo, reduzindo a atividade enzimática e comprometendo o funcionamento da microbiota do solo. A interferência antrópica pode limitar a absorção do nitrogênio pelas plantas, devido à diminuição da fixação biológica e perdas de nitrato por lixiviação em áreas suscetíveis a erosão (GROPPO et al., 2015).

Investigações mais específicas de como os atributos microbiológicos são afetados, em relação ao ecossistema, a fisionomia vegetal e o nível de alteração antrópica são importantes na identificação e categorização do grau de impacto ambiental. Os objetivos deste capítulo foram: i) identificar as relações entre os

atributos microbiológicos do solo e os parâmetros físicos e químicos do solo; e com atributos da vegetação, em diferentes ecossistemas terrestres brasileiros (Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Floresta Ombrófila Densa Submontana e Montana, Floresta Ombrófila Mista Altomontana, Campos de Altitude, Floresta Estacional Decidual e áreas de Savana florestada e arborizada do Cerrado); ii) avaliar comparativamente os atributos microbiológicos do solo quanto a sua sensibilidade em caracterizar diferentes ecossistemas e/ou indicar mudanças no sistema solo-planta.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

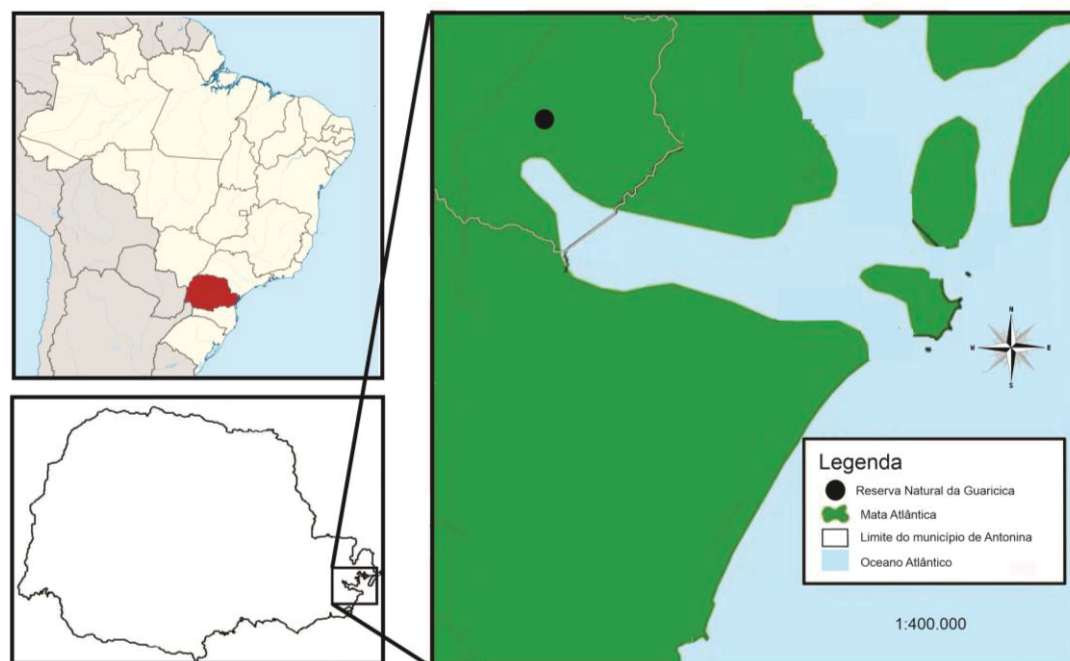
6.4.1 Áreas de Estudo

As áreas deste estudo fazem parte de quatro ecossistemas terrestres brasileiros: Floresta Ombrófila Densa (FOD), Floresta Ombrófila Mista (FOM), Campos de Altitude e Cerrado. As amostras de solo da Floresta Ombrófila Densa foram coletadas em unidade de conservação da Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental (SPVS) (BIANCHIN, 2017). Para as áreas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, as amostras foram coletadas por pesquisadores do Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio), no Parque Nacional de São Joaquim, em Santa Catarina; e para a área de Cerrado, as amostras foram de coletas em parceria com o Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura (ITTI), no município de São Desidério, estado da Bahia (TREML, 2021).

A área de Floresta Ombrófila Densa faz parte do bioma Mata Atlântica, que neste estudo é representado por três fisionomias florestais: FOD de Terras Baixas, FOD Submontana e FOD Montana (RODERJAN et al., 2002). São áreas de sucessão secundária, com diferentes idades após desmatamento e abandono. As parcelas com menor altitude (P3, P5 e P7) tiveram histórico de maior exploração, com corte raso das florestas e utilização agropecuária por períodos indefinidos, e estão na atualidade em fases intermediárias da sucessão florestal, enquanto a parcela P9, localizada em maior altitude, sofreu menor impacto antrópico possuindo ainda espécies de idade avançada, algumas consideradas raras ou em risco de extinção (BIANCHIN, 2017).

As parcelas estão localizadas na Reserva Natural Guaricica (RNG) nas coordenadas 25°8' sul e 48°41' oeste, no município de Antonina, Paraná, em clima Cfa, conforme a classificação de Köppen, com precipitação média de 1976 mm e temperatura média em torno dos 22 °C (BHERING et al., 2007; IAPAR, 2021). São quatro parcelas de Floresta Ombrófila Densa, a parcela P3 está localizada no terço inferior da encosta (Terras Baixas), a 30 metros de altitude, a parcela P5 está localizada no terço médio da encosta (Submontana), 90 metros de altitude, a parcela P7 está situada no terço superior da encosta e possui altitude de 190 metros (Submontana), e a parcela P9, localizada próxima ao topo da encosta (Montana), possui altitude de 470 metros (FIGURA 17). O solo foi classificado como Cambissolo Háplico. Mais características e detalhes das formações vegetais podem ser obtidos em Woiciechowski e Marques (2017) e Oliveira et al. (2019).

FIGURA 17 – Localização da Reserva Natural Guaricica, área de Floresta Ombrófila Densa, localizada no município de Antonina, Paraná.

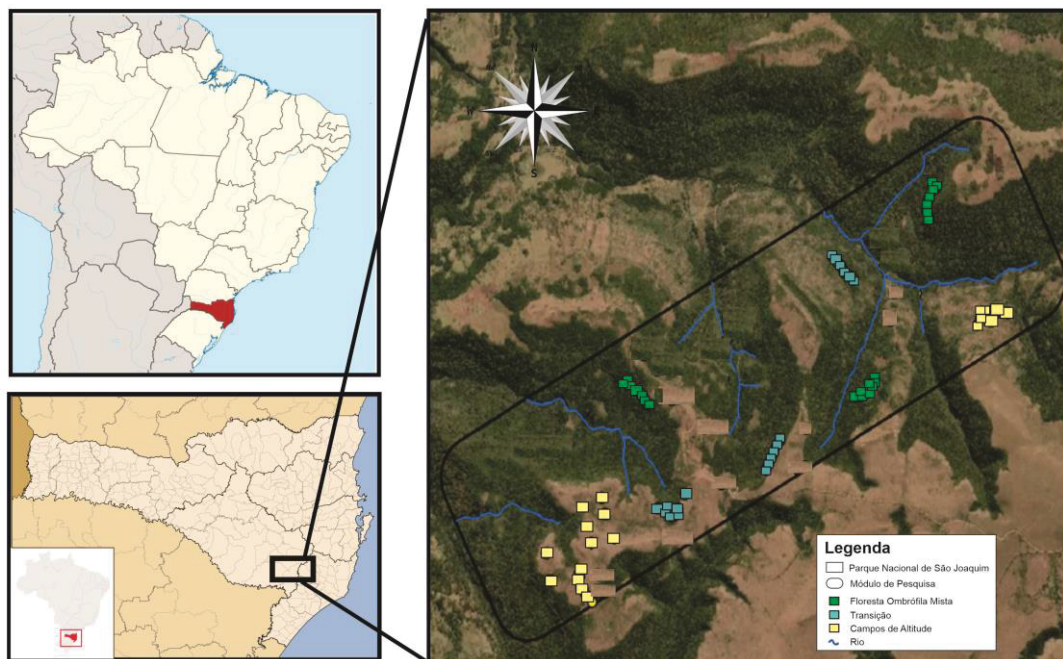


Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

A Floresta Ombrófila Mista e os Campos de Altitude estão localizados no Parque Nacional de São Joaquim (PNSJ), municípios de Urubici e Bom Jardim da Serra, no estado de Santa Catarina, coordenadas 28°09' sul e 49°39' oeste (FIGURA 18). O clima é classificado como mesotérmico superúmido, com dias muito frios e no

inverno são frequentes noites com temperaturas negativas (BLANCO, 2021); a temperatura média anual é de 12 °C, com pluviosidade média anual de 1600 mm, classificação Cfb, de acordo com Köppen (VIANNA et al., 2015). A fisionomia da Floresta Ombrófila Mista é classificada como Altomontana; já nos Campos de Altitude, a vegetação é predominantemente de gramíneas; e nos ambientes mais úmidos, pode-se encontrar turfeiras. São áreas de sucessão e regeneração desde a criação do parque em 1961 (BITTENCOURT, 2019). Os solos do PNSJ geralmente têm horizonte A húmico ou proeminente, são moderadamente rasos e foram classificados como Neossolos Litólicos e/ou Regolíticos, e Cambissolos Húmicos e/ou Háplicos (DALMOLIN et al., 2017).

FIGURA 18 – Localização do módulo de pesquisa com parcelas de Floresta Ombrófila Mista Altomontana, transição e Campos de Altitude, situado dentro do Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.

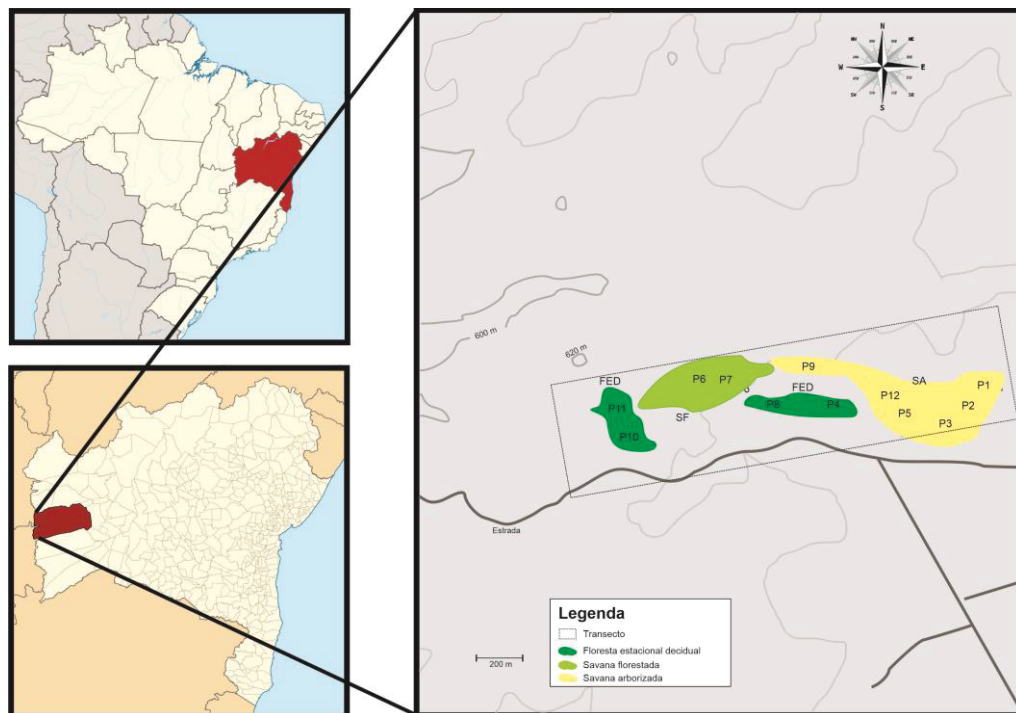


Fonte: Adaptado de Costa (2020).

A área de Cerrado está localizada nas coordenadas 12°22' sul e 44°55' oeste, município de São Desidério, estado da Bahia; apresenta clima tropical com verões quentes e úmidos, do tipo Aw, de acordo com Köppen (1936), com precipitações anuais em torno de 750 mm e temperatura média anual de 25 °C. A

região está situada em uma transição ente fisionomias vegetais, as áreas foram identificadas como: Savana Arborizada, Savana Florestada e Floresta Estacional Decidual (TREML et al., 2022). Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho na área savânica, e Cambissolo na área florestal. Mais detalhes da vegetação podem ser obtidos em Treml (2021). A FIGURA 19 mostra a localização da área de Cerrado e as parcelas que compõem o transecto com as três fisionomias vegetais.

FIGURA 19 – Localização do transecto com as parcelas de Savana Arborizada, Savana Florestada e Floresta Estacional Decidual, situado no município de São Desidério, oeste da Bahia.



Fonte: Adaptado de Treml (2021).

6.4.2 Coleta e caracterização física e química das amostras de solo

Nos quatro ecossistemas foram coletadas amostras de solo da camada superficial do solo (0-10 cm). As análises dos atributos microbiológicos do solo foram realizadas conforme descrito em MATERIAL E MÉTODOS GERAL (itens 2.2 ao 2.5 desta tese).

Na RNG, as amostras de solo foram coletadas em corredores de 250m instalados ao longo da cota altitudinal de cada parcela. Foram coletados 6 pontos equidistantes de 50m em cada transecto de cada parcela. Os atributos químicos do solo nas quatro parcelas experimentais, na camada 0-10 cm de profundidade se encontram na TABELA 12. As análises químicas do solo foram realizadas conforme descritas no item 2.6.

TABELA 12 - Atributos químicos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa localizadas no município de Antonina, Paraná.

Parcela	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	P	C	N
	CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----				--%--	mg dm ⁻³	-----g kg ⁻¹ -----	
P3	3,79	2,25	0,40	0,51	0,14	8,24	8,71	30,45	4,86
P5	3,88	2,08	0,45	0,42	0,14	8,54	7,55	33,65	4,73
P7	3,76	2,43	0,37	0,38	0,15	7,29	5,52	31,79	4,47
P9	3,45	3,34	0,57	0,45	0,13	6,36	5,27	41,90	5,66

Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

No PNSJ o módulo de pesquisa possui 500 ha de área total (1 x 5 km); dentro do módulo foram instaladas 20 parcelas experimentais, compostas por corredores de 250 m que seguem às curvas de nível, com repetições a cada 50 m (0, 50, 100, 150, 200 e 250 m) onde se coletaram as amostras de solo (COSTA et al., 2020). Para este estudo, foram selecionadas 9 parcelas experimentais. As parcelas P1, P2 e P3 estão situadas em Floresta Ombrófila Mista, as parcelas P4, P5 e P6 em área de transição entre Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, e as parcelas P7, P8 e P9, situadas em Campos de Altitude. Os atributos granulométricos e químicos do solo da camada 0-10 cm estão na TABELA 13. Os atributos químicos foram determinados conforme descrito no item 2.6. A granulometria foi realizada pelo método da pipeta, utilizando NaOH como dispersante das frações de areia, silte e argila (COSTA, 2020; COSTA et al., 2020).

TABELA 13 - Atributos granulométricos e químicos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.

Parcela	Areia	Silte	Argila	C	N	P	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V	pH
	g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹			cmol _c dm ⁻³			-%-	CaCl ₂	
P1	55,0	287,9	657,2	116,3	8,5	14,8	4,3	0,3	3,3	0,7	15,9	3,7
P2	89,6	343,1	567,3	61,3	4,5	11,1	3,0	0,7	2,2	0,5	14,8	4,0
P3	67,6	587,2	345,2	118,4	7,6	10,1	3,0	0,3	6,2	1,4	31,7	3,9
P4	90,0	343,1	567,3	66,0	4,9	5,0	2,2	0,3	4,6	2,8	32,0	4,1
P5	389,7	376,7	233,6	135,9	10,8	15,6	1,3	0,3	10,0	4,1	45,1	4,4
P6	149,5	400,2	450,3	233,4	17,1	29,8	2,4	0,2	6,8	1,2	26,7	4,1
P7	524,8	271,7	203,5	106,6	5,7	10,1	1,5	0,3	6,5	1,6	36,2	4,2
P8	640,4	229,8	129,8	233,4	12,9	18,1	3,6	0,5	1,6	0,5	9,1	4,1
P9	434,1	425,3	140,6	145,3	8,8	25,7	4,0	0,5	2,3	0,8	12,4	3,9

Fonte: Adaptado de Costa (2020).

Na área de Cerrado foi delineado um transecto, dividido em 12 parcelas, e posteriormente agrupadas conforme similaridade da fitofisionomia, com os seguintes grupos: grupo I (Savana Arborizada) foi composto pelas parcelas denominadas P1, P2, P3, P5, P9 e P12; grupo II (Floresta Estacional Decidual) pelas parcelas P4, P8, P10 e P11; e grupo III (Savana Florestada) pelas parcelas P6 e P7 (TREML, 2021). Foi realizada análise química, conforme a metodologia descrita no item 2.6 (TABELAS 14 e 15).

TABELA 14 – Média dos parâmetros químicos do solo nos grupamentos I, II e III, na profundidade 0-10, localizadas no município de São Desidério, Bahia.

Grupo	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	P	N	C
	CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³			--%--	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹		
I	4,74	0,03	3,23	0,25	0,53	58,17	9,31	0,54	5,85
II	5,31	0,04	7,20	0,65	1,88	76,65	14,56	1,37	15,25
III	4,40	0,14	2,97	0,24	0,57	51,60	10,25	0,90	9,33

Fonte: Adaptado de Treml (2021).

TABELA 15 - Atributos químicos do solo na profundidade 0-10 cm, nas parcelas do estudo localizadas no município de São Desidério, Bahia.

Parcela	Grupo	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	V	P	N	C
		CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----				-%-	mg kg ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----	
1	I	4,55	0,06	2,44	0,14	0,49	53,2	10,22	0,44	4,65
2	I	4,78	0,01	3,80	0,35	0,56	63,6	9,26	0,64	6,93
3	I	4,70	0,03	4,97	0,20	0,52	67,8	8,34	0,52	5,74
4	II	4,93	0,03	6,30	0,50	1,24	71,5	10,98	1,08	12,06
5	I	4,75	0,03	3,11	0,23	0,42	58,2	7,90	0,51	5,68
6	III	4,12	0,21	1,69	0,19	0,55	41,7	10,58	0,75	8,43
7	III	4,68	0,07	4,25	0,29	0,58	61,5	9,91	1,05	10,24
8	II	5,20	0,08	6,08	0,55	2,52	75,3	17,42	1,12	13,30
9	I	4,90	0,03	3,12	0,35	0,68	60,6	9,49	0,57	6,14
10	II	5,66	0,02	9,12	0,90	2,29	82,0	17,57	1,88	21,28
11	II	5,45	0,02	7,29	0,67	1,48	77,8	12,28	1,37	14,36
12	I	4,65	0,04	1,94	0,23	0,52	45,6	10,67	0,55	5,97

Fonte: Adaptado de Treml (2021).

6.4.3 Dados de florística e fitossociologia

Foi realizado o levantamento dos indivíduos arbóreos das espécies florestais presentes nas áreas de Floresta Ombrófila Densa e de Cerrado. Nas parcelas da Floresta Ombrófila Densa (RNG), foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) para todos os indivíduos arbóreos, seguindo os procedimentos descritos por Magnusson et al. (2005). Para estrutura horizontal das áreas, foram realizadas estimativas dos parâmetros fitossociológicos de densidade absoluta (DA), dominância absoluta (DoA) e calculado o Valor de Importância (VI) das espécies (APÊNDICES 1, 2, 3 e 4) (BIANCHIN, 2017).

Para a área de Cerrado na Bahia, foi realizado levantamento dos indivíduos arbóreos das espécies florestais, seguindo o mesmo procedimento da RNG. Nos APÊNDICES 5, 6 e 7, estão descritos os parâmetros fitossociológicos, sendo que as fisionomias foram divididas em: Savana Arborizada (grupamento I), Floresta Estacional Decidual (grupamento II) e Savana Florestada (grupamento III) (TREML, 2021).

6.4.4 Análises estatísticas

Os resultados dos atributos microbiológicos do solo dos ecossistemas foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e à comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o software RStudio (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019). Os dados do estudo fitossociológico e os atributos químicos e físicos do solo, foram relacionados com os atributos microbiológicos do solo em cada ecossistema, por correlações lineares (PEARSON). Foi utilizado o método de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) para ordenação e avaliação da composição dos atributos microbiológicos entre as áreas dos ecossistemas, utilizando o índice de Bray-Curtis. Testes de Monte Carlo foram utilizados para avaliar a significância do conjunto de dados dos atributos microbiológicos entre as fisionomias vegetais dos ecossistemas ($p < 0,05$). Para a correlação de Pearson e o NMDS foi utilizado o software estatístico Past 4.01 (HAMMER et al., 2001). A análise de componentes principais (ACP) foi realizada usando o software MINITAB versão 19 (MCKENZIE e GOLDMAN, 1999).

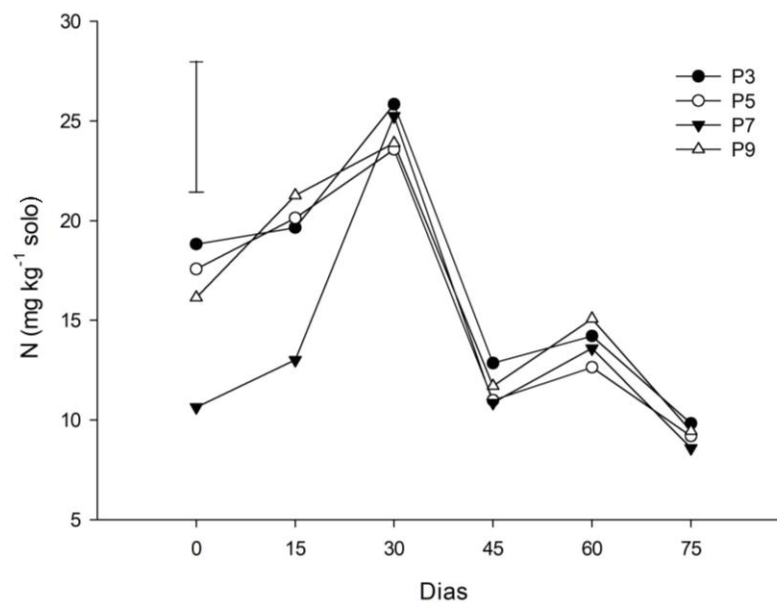
6.5 RESULTADOS

6.5.1 Atributos microbiológicos do solo

6.5.1.1 Reserva Natural Guaricica

A mineralização mostrou-se similar entre as parcelas P3, P5, P7 e P9, com menores valores de N mineralizado para a parcela P7 nas duas primeiras extrações. O pico de mineralização ocorreu aos 30 dias de incubação, com valores próximos a 25 mg N kg^{-1} solo, sem diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% entre as parcelas de Terras Baixas, Submontana e Montana. Após 30 dias de incubação, a mineralização de N teve queda acentuada e se manteve em valores baixos até o final do ensaio, aos 75 dias de incubação (FIGURA 20).

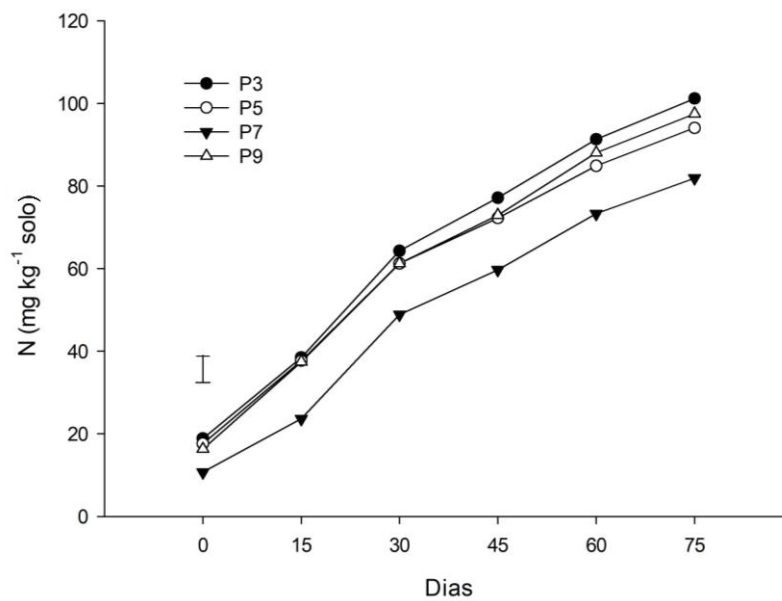
FIGURA 20 - Valores médios de nitrogênio mineralizado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.



P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana. A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O nitrogênio mineralizado acumulado mostrou diferença mínima significativa apenas na primeira extração. Nas extrações seguintes, não houve diferenças entre as parcelas de estudo. Ao final dos 75 dias de ensaio, os valores acumulados de N mineral, variaram entre 82 e 101 mg N kg⁻¹ solo (FIGURA 21).

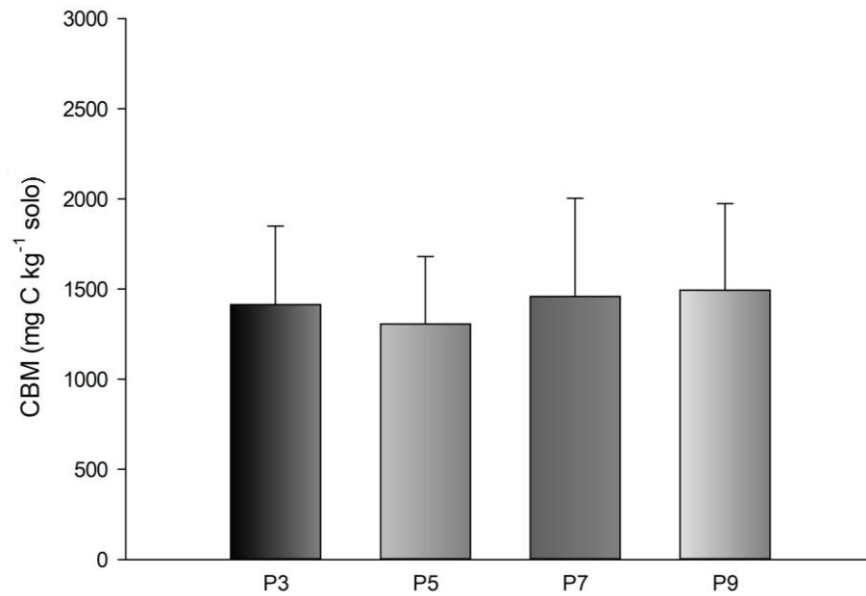
FIGURA 21 - Valores médios de nitrogênio mineral acumulado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.



P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana. A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para o carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) não foram observadas diferenças estatísticas entre as parcelas de Floresta Ombrófila Densa na profundidade 0-10 cm. Os valores variaram entre 1306 e 1494 mg C kg⁻¹ solo nas parcelas analisadas (FIGURA 22).

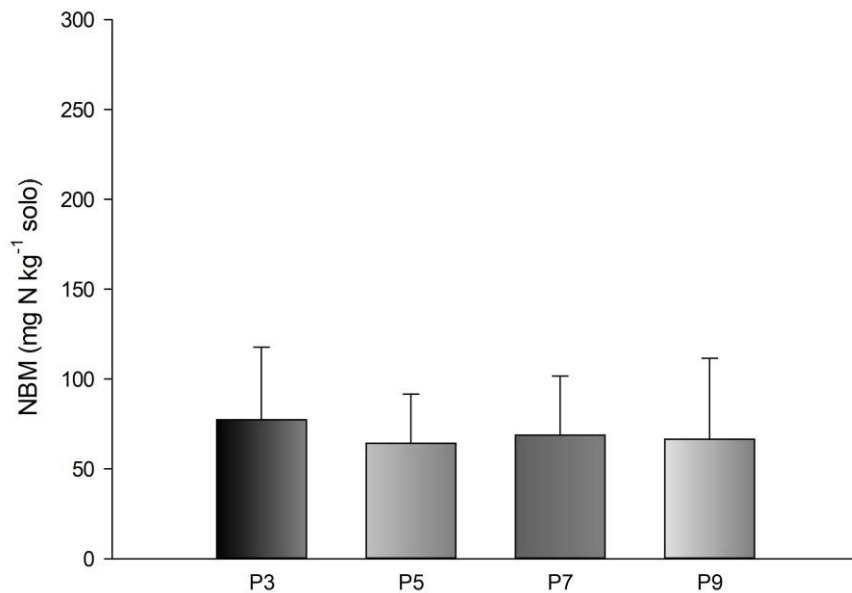
FIGURA 22 - Valores médios de carbono da biomassa microbiana do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.



P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana. A barra vertical representa o desvio padrão médio.

Assim como para o CBM, o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) não apresentou diferença estatística entre as áreas de Floresta Ombrófila Densa, de acordo com o teste de Tukey 5% (FIGURA 23). As médias dos valores variaram entre 64 e 77 mg N kg⁻¹ solo nas parcelas de FOD.

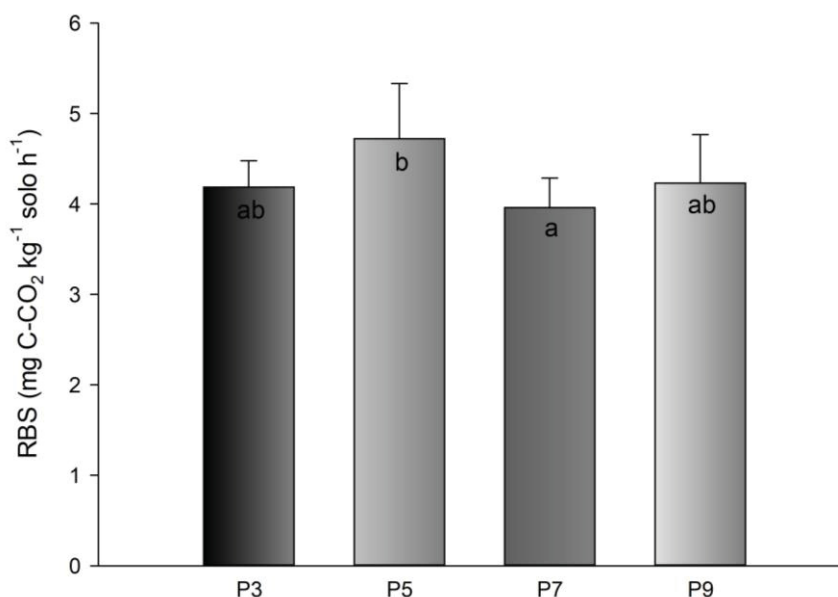
FIGURA 23 - Valores médios de nitrogênio da biomassa microbiana do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.



P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana. A barra vertical representa o desvio padrão médio.

A respiração basal do solo, diferentemente do Nmin, CBM, e NBM, mostrou diferença significativa entre as parcelas (FIGURA 24). A parcela P7 teve o menor valor médio de RBS, com 3,96 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹, e foi estatisticamente inferior à parcela P5, que teve 4,72 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹.

FIGURA 24 - Valores médios da respiração basal do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.



P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana. A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os valores médios do quociente metabólico não apresentaram diferenças significativas (TABELA 16). Assim como os outros atributos microbiológicos analisados (Nmin, CBM, NBM e RBS), houve pouca variação dos valores entre as parcelas P3, P5, P7 e P9.

TABELA 16 – Valores médios do quociente metabólico, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, localizadas na Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.

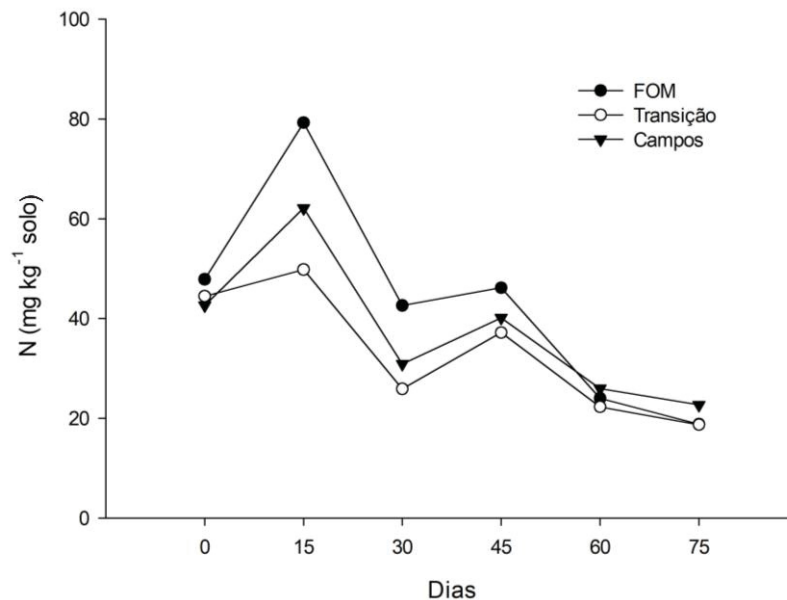
P3	P5	P7	P9
qCO_2 (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)			
3,14	3,85	2,98	3,15

P3 = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas. P5, P7 = Floresta Ombrófila Densa Submontana. P9 = Floresta Ombrófila Densa Montana.

6.5.1.2 Parque Nacional de São Joaquim

A Floresta Ombrófila Mista e os Campos de Altitude, mostraram os maiores picos de nitrogênio mineralizado 15 dias após a incubação. A área de transição Floresta Ombrófila Mista/Campos de Altitude mostrou menores valores médios de nitrogênio mineralizado. Em todas as áreas a mineralização mostra decréscimo após 15 dias de incubação (FIGURA 25).

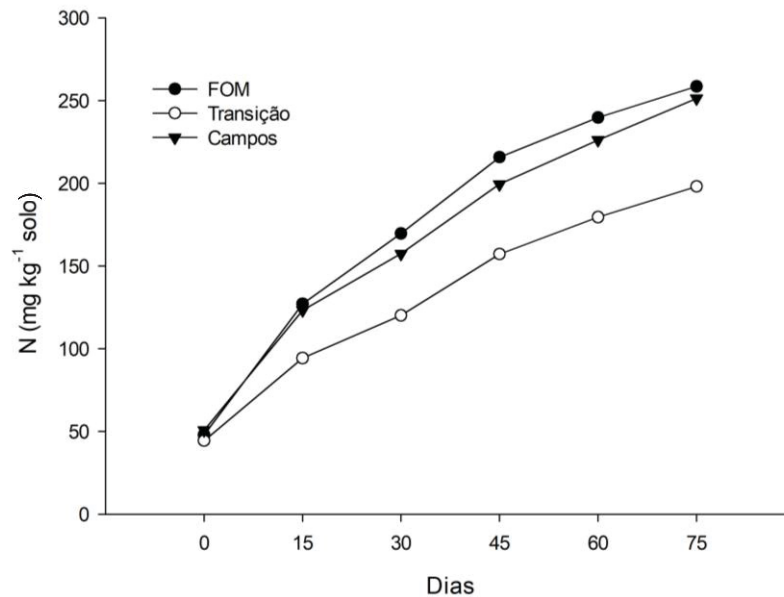
FIGURA 25 - Valores médios de mineralização do nitrogênio na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.



FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2 ,P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9).

Ao analisar o nitrogênio mineral acumulado, os resultados mostraram os maiores valores de N mineral acumulado nas parcelas de FOM e Campos de Altitude; e os menores valores na área de transição; no entanto, não foi observada diferença estatística (Tukey 5%) entre as fisionomias vegetais para este atributo microbiológico (FIGURA 26).

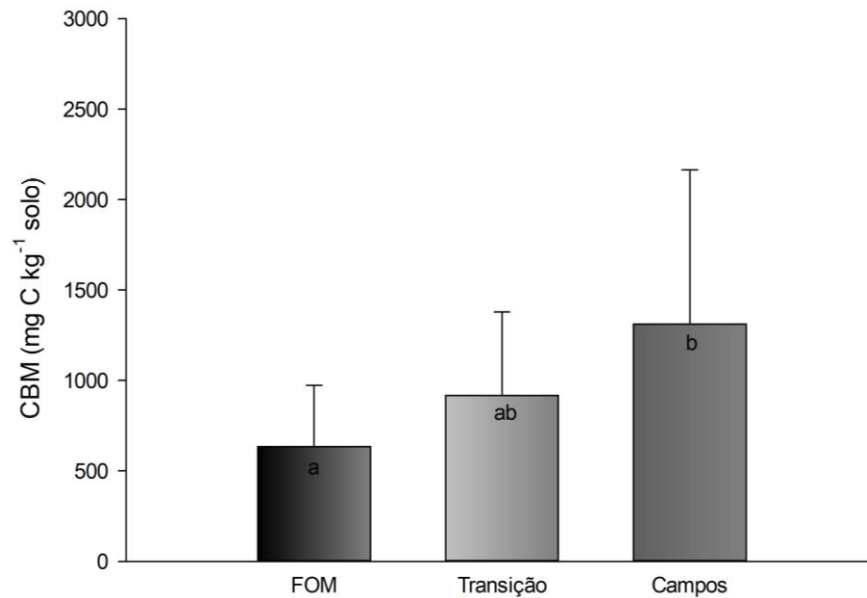
FIGURA 26 - Valores médios de nitrogênio mineral acumulado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.



FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2, P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9).

A área de Campos de Altitude teve as parcelas com maiores valores de CBM, com média de 1311 mg C kg⁻¹ solo; e foi estatisticamente diferente da média das parcelas de Floresta Ombrófila Mista, com 633 mg C kg⁻¹ solo; já a área de transição, mostrando valores intermediários, não diferiu estatisticamente da Floresta Ombrófila Mista e da área de Campos de Altitude (FIGURA 27).

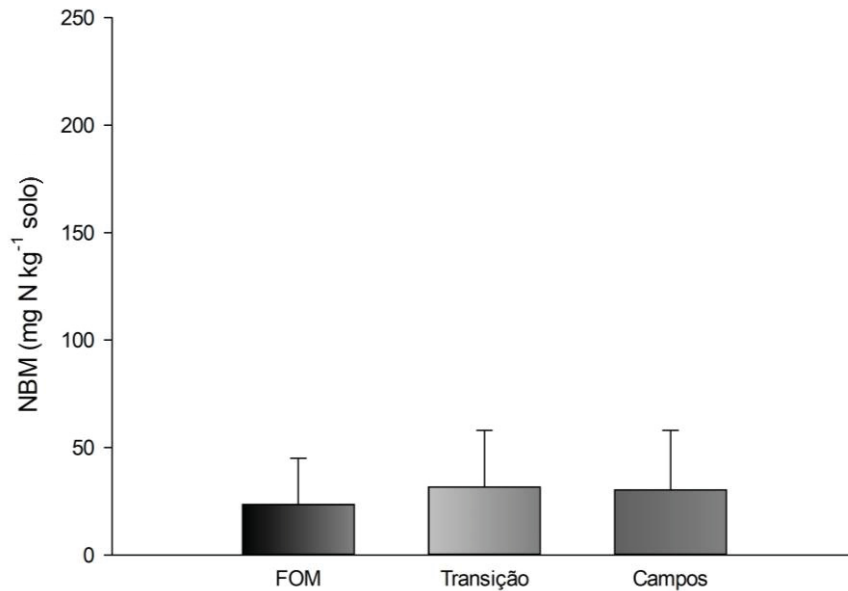
FIGURA 27 - Valores médios do carbono da biomassa microbiana, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.



FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2, P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9). A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O nitrogênio da biomassa microbiana não apresentou a mesma tendência que o CBM. Não foi possível distinguir diferenças entre as fisionomias vegetais para este atributo. Os valores variaram entre 24 e 31 mg N kg⁻¹ solo (FIGURA 28).

FIGURA 28 - Valores médios do nitrogênio da biomassa microbiana, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.

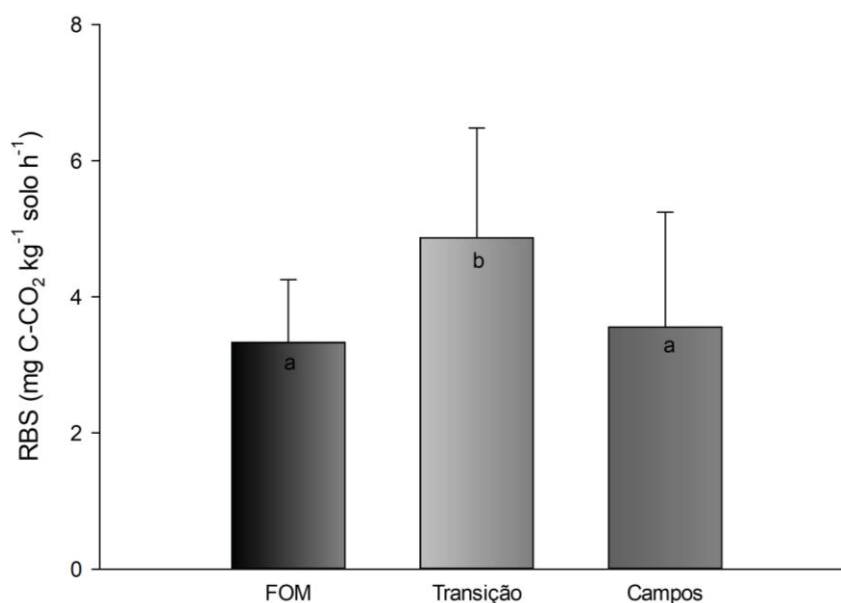


FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2, P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9). A barra vertical representa o desvio padrão médio.

A respiração basal do solo mostrou valores próximos entre as áreas do PNSJ. A média dos valores da RBS variaram entre 3,3 e 4,8 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹, com maior atividade na área de transição Floresta Ombrófila Mista/Campos de Altitude.

Para o quociente metabólico, as variações também foram pequenas entre os grupos, com maior valor médio para a área de transição (5,3 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM hora⁻¹), seguido da Floresta Ombrófila Mista e dos Campos de Altitude, com valores médios de 4,3 e 3,4 mg C-CO₂ g⁻¹ CBM hora⁻¹, respectivamente. Diferentemente do CBM, onde os Campos de Altitude obtiveram os maiores valores, para a RBS e o qCO₂ os maiores valores foram encontrados em áreas de transição FOM/Campos de Altitude (FIGURA 29 e TABELA 17).

FIGURA 29 - Valores médios da respiração basal do solo, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.



FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2 ,P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9). A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

TABELA 17 – Valores médios do quociente metabólico, na profundidade 0-10 cm, nas parcelas de Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, localizadas no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.

FOM	Transição	Campos
qCO_2 (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)		
4,3 ab	5,3 b	3,4 a

FOM = Floresta Ombrófila Mista (P1, P2 ,P3); Transição = FOM/Campos de Altitude (P4, P5, P6); Campos = Campos de Altitude (P7, P8, P9). Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

6.5.1.3 Área de Cerrado

Nas áreas de Cerrado, de modo geral, os picos de mineralização ocorreram entre 15 e 30 dias após o início da incubação, e foram diminuindo gradativamente

(TABELA 18 e FIGURA 30a). Nas extrações a partir dos 30 dias de incubação, os valores entre as parcelas começaram a mostrar diferenças estatísticas.

TABELA 18 - Valores médios de nitrogênio mineralizado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas do estudo localizadas na área de Cerrado, São Desidério, Bahia.

Parcela	Grupo	Dias de incubação					
		0	15	30	45	60	75
N (mg kg ⁻¹ solo)							
P1	I	3,3 a	4,9	4,7 a	1,2 a	0,7 a	1,9 ab
P2	I	5,3 ab	5,6	6,9 a	2,5 ab	1,9 abcde	2,8 abc
P3	I	4,6 ab	6,4	7,1 a	2,5 ab	1,6 abc	1,9 bc
P4	II	6,5 bcd	7,0	10,0 ab	3,1 b	2,5 cde	2,9 abc
P5	I	4,4 ab	6,5	4,6 a	2,3 ab	1,3 ab	1,8 a
P6	III	5,4 abc	6,6	7,2 a	3,0 b	2,3 bcde	2,9 abc
P7	III	4,9 ab	5,8	6,9 a	2,8 ab	1,9 abcde	2,8 abc
P8	II	6,8 bcd	8,2	9,5 ab	3,3 b	2,6 cde	3,1 bc
P9	I	5,2 ab	5,8	4,5 a	2,7 ab	2,1 bcde	2,4 abc
P10	II	8,4 cd	12,6	13,5 b	3,6 b	3,2 e	3,5 c
P11	II	8,5 d	7,9	8,7 ab	3,6 b	3,1 de	3,6 c
P12	I	5,6 abcd	6,2	4,6 a	3,0 b	1,8 abcd	1,8 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao final do ensaio, 75 dias após a incubação, as parcelas com maiores valores médios de nitrogênio mineralizado acumulado foram a P10 (44 mg N kg⁻¹ solo), seguida da P11, P8 e P4, com valores médios de 35, 33 e 32 mg kg⁻¹ solo, respectivamente. Estas quatro parcelas fazem parte do grupamento II, ou seja, são parcelas de Floresta Estacional Decidual (TABELA 19).

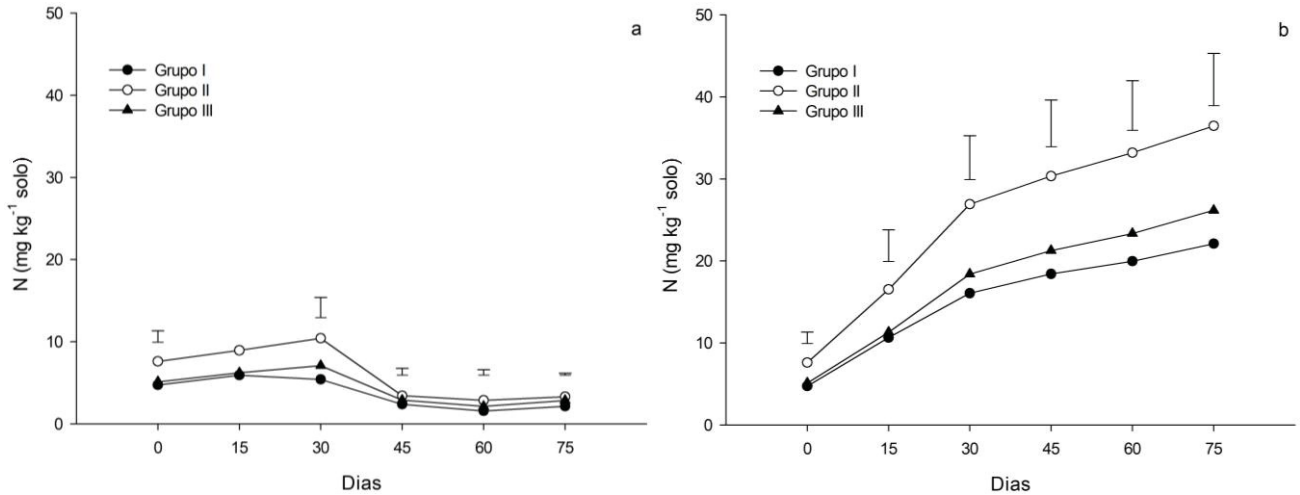
TABELA 19 - Valores médios de nitrogênio mineralizado acumulado na profundidade 0-10 cm, nas parcelas do estudo localizadas na área de Cerrado, São Desidério, Bahia.

Parcela	Grupo	Dias de incubação					
		0	15	30	45	60	75
N (mg kg ⁻¹ solo)							
P1	I	3,3 a	8,3 a	13,0 a	14,1 a	14,8 a	16,7 a
P2	I	5,3 ab	10,9 a	17,8 a	20,3 ab	22,2 ab	25,0 ab
P3	I	4,6 ab	10,9 a	18,1 a	20,5 ab	22,1 ab	24,0 ab
P4	II	6,5 bcd	13,5 ab	23,5 ab	26,6abc	29,2 bc	32,1 bc
P5	I	4,4 ab	10,9 a	15,5 a	17,8 ab	19,0 ab	20,9 ab
P6	III	5,4 abc	12,0 ab	19,2 a	22,2 ab	24,5 ab	27,3 ab
P7	III	4,9 ab	10,6 a	17,6 a	20,3 ab	22,2 ab	25,0 ab
P8	II	6,8 bcd	15,1 ab	24,6 ab	27,8 bc	30,5 bc	33,6 bc
P9	I	5,2 ab	11,0 a	15,5 a	18,2 ab	20,3 ab	22,7 ab
P10	II	8,4 cd	21,1 b	34,5 b	38,1 c	41,2 c	44,8 c
P11	II	8,5 d	16,4 ab	25,1 ab	28,8 bc	31,9 bc	35,4 bc
P12	I	5,6 abcd	11,8 ab	16,4 a	19,4 ab	21,2 ab	23,1 ab

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de N mineralizado acumulado dos grupos I (P1, P2, P3, P5, P9 e P12 - savana arborizada) e III (P6 e P7 - savana florestada) são inferiores aos observados no grupo II (P4, P8, P10 e P11 – Floresta Estacional Decidual) (TABELA 19 E FIGURA 30b).

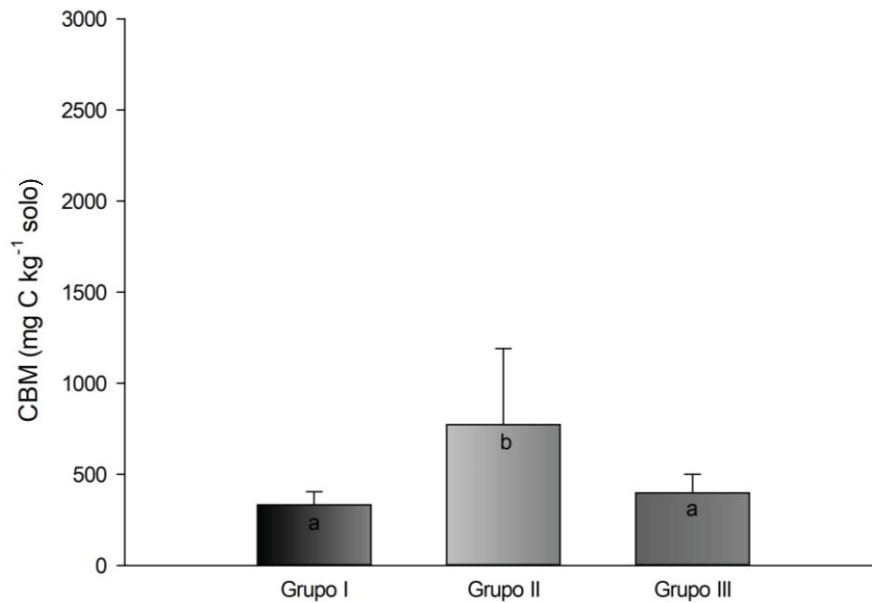
FIGURA 30 - Valores médios do ensaio de mineralização do nitrogênio (a) e nitrogênio mineral acumulado (b), na profundidade 0-10 cm, nos grupamentos I, II e III, localizadas na área de Cerrado, São Desidério, Bahia.



Grupo I = Savana Arborizada. Grupo II = Floresta Estacional Decidual. Grupo III = Savana Florestada. A barra vertical representa a diferença mínima significativa (DMS), de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

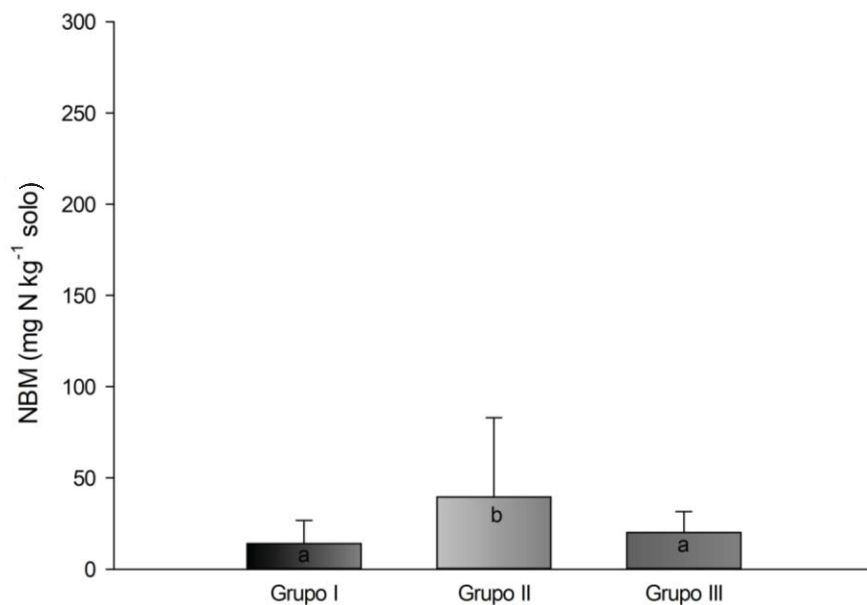
O CBM e o NBM mostraram comportamento semelhante observado para o N mineralizado acumulado, com maiores valores para o grupamento II (Floresta Estacional Decidual). Para o grupo II, o valor médio foi de 773 mg C kg⁻¹ solo; e para os grupamentos I e III foram 332 e 398 mg C kg⁻¹ solo, respectivamente. O NBM mostrou valores médios de 12, 40 e 20 mg C kg⁻¹ solo, para os grupos I, II e III, respectivamente (FIGURAS 31 e 32).

FIGURA 31 - Valores médios do carbono da biomassa microbiana, profundidade 0-10 cm, nos grupamentos I, II e III, localizadas no Cerrado, São Desidério, Bahia.



A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

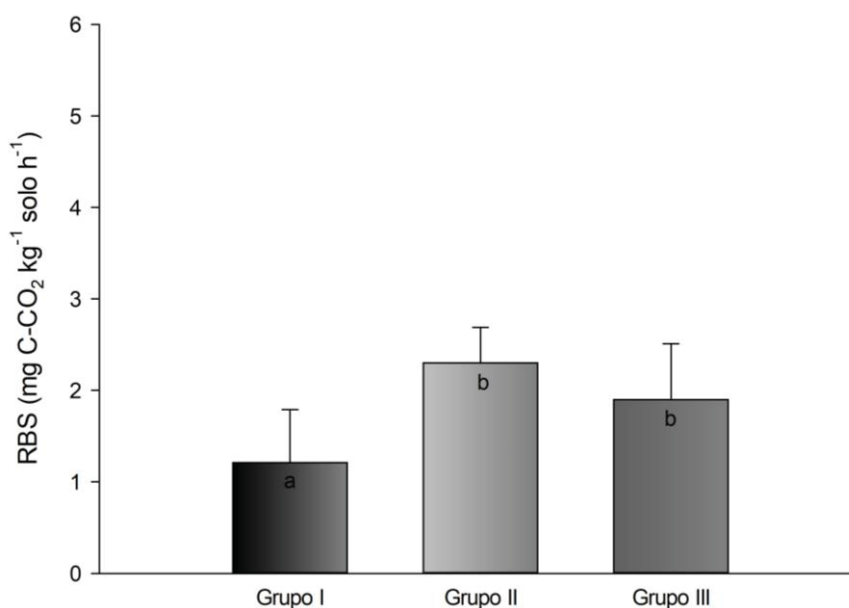
FIGURA 32 - Valores médios de nitrogênio da biomassa microbiana, profundidade 0-10 cm, nos grupamentos I, II e III, localizadas no Cerrado, São Desidério, Bahia.



A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Assim como nos outros atributos microbiológicos, o grupamento II teve os maiores valores médios de respiração basal do solo, no entanto, juntamente com o grupamento III, foram significativamente maiores que o grupamento I (FIGURA 33).

FIGURA 33 - Valores médios da respiração basal do solo, profundidade 0-10 cm, nos grupamentos I, II e III, localizadas no Cerrado, São Desidério, Bahia.



A barra vertical representa o desvio padrão médio. Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O quociente metabólico foi o único atributo microbiológico do solo que não mostrou diferenças entre os grupamentos I, II e III no Cerrado (TABELA 20).

TABELA 20 – Valores médios do quociente metabólico, profundidade 0-10 cm, nos grupamentos I, II e III, localizadas no Cerrado, São Desidério, Bahia.

Grupo I	Grupo II	Grupo III
qCO_2 (mg C-CO ₂ g ⁻¹ CBM h ⁻¹)		
3,8	3,7	5,2

Grupo I = Savana Arborizada. Grupo II = Floresta Estacional Decidual. Grupo III = Savana Florestada.
 qCO_2 – quociente metabólico.

6.5.2 Relações dos atributos físicos e químicos do solo e da vegetação com os atributos microbiológicos nos ecossistemas

Ao avaliar separadamente cada ecossistema, é possível observar que as interações entre os atributos são particulares dentro de cada fisionomia vegetal.

Na FOD (Reserva Natural Guaricica), foi possível identificar correlação significativa entre o nitrogênio mineralizado e a dominância absoluta (Nmin x DoA) (TABELA 21). As demais correlações testadas foram insignificantes.

TABELA 21 – Correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos, químicos e fitossociológicos, na Reserva Natural Guaricica, Paraná.

	pH	Ca	Mg	K	P	C	N	DA	DoA
Nmin	-0,361	-0,169	-0,020	-0,305	-0,017	-0,024	-0,004	0,215	0,649*
CBM	-0,132	-0,072	-0,051	-0,094	-0,123	-0,008	-0,026	0,043	0,107
NBM	-0,049	-0,342	-0,272	-0,325	-0,219	-0,285	-0,311	0,149	0,021
RBS	0,169	0,027	0,018	-0,021	0,127	0,019	-0,026	-0,211	-0,114
qCO ₂	0,094	0,079	-0,077	0,032	-0,007	0,102	0,014	-0,394	-0,156

Pares de variáveis com coeficiente de correlação positivos e valores ($p < 0,05$) tendem a aumentar juntos. Pares com coeficiente de correlação negativo e valores ($p < 0,05$), uma das variáveis tende a diminuir enquanto a outra aumenta. Pares com valores ($p > 0,05$) não há relação significativa entre as duas variáveis. * = significativo.

Nas fisionomias vegetais do Cerrado, foram observadas muitas correlações positivas; e as que se destacaram foram entre Nmin, CBM e NBM e praticamente todos os atributos químicos e fitossociológicos. As correlações mais estreitas foram: Nmin x C, Nmin x N, Nmin x Mg, CBM x C e CBM x N. A densidade absoluta e a dominância absoluta mostraram correlações com a maioria dos atributos microbiológicos. O qCO₂ foi mostrou correlação apenas com o pH do solo, sendo ela negativa (TABELA 22).

TABELA 22 – Correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos, químicos e fitossociológicos, na área de Cerrado, Bahia.

	pH	Ca	Mg	K	P	C	N	DA	DoA
Nmin	0,777*	0,878*	0,941*	0,858*	0,814*	0,971*	0,953*	0,602*	0,857*
CBM	0,758*	0,844*	0,916*	0,775*	0,770*	0,943*	0,924*	0,603*	0,788*
NBM	0,726*	0,808*	0,888*	0,849*	0,876*	0,931*	0,908*	0,567	0,781*
RBS	0,304	0,547	0,556	0,633*	0,605*	0,705*	0,670*	0,288	0,648*
qCO ₂	-0,597*	-0,306	-0,453	-0,235	-0,279	-0,276	-0,302	-0,356	-0,152

Pares de variáveis com coeficiente de correlação positivos e valores ($p < 0,05$) tendem a aumentar juntos. Pares com coeficiente de correlação negativo e valores ($p < 0,05$), uma das variáveis tende a diminuir enquanto a outra aumenta. Pares com valores ($p > 0,05$) não há relação significativa entre as duas variáveis. ^{ns} = não significativo.

No Parque Nacional de São Joaquim, onde se encontraram os ecossistemas de Floresta Ombrófila Mista, Campos de Altitude e a área de transição, não foram observadas correlações significativas para a maioria dos atributos analisados. Houve correlação positiva significativa apenas para Nmin x K, CBM x C, RBS x Ca. Os atributos microbiológicos NBM e qCO₂ não tiveram correlação significativa com os atributos químicos e com o teor de argila do solo (TABELA 23).

TABELA 23 – Correlação de Pearson entre os atributos microbiológicos, físicos e carbono orgânico do solo, no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.

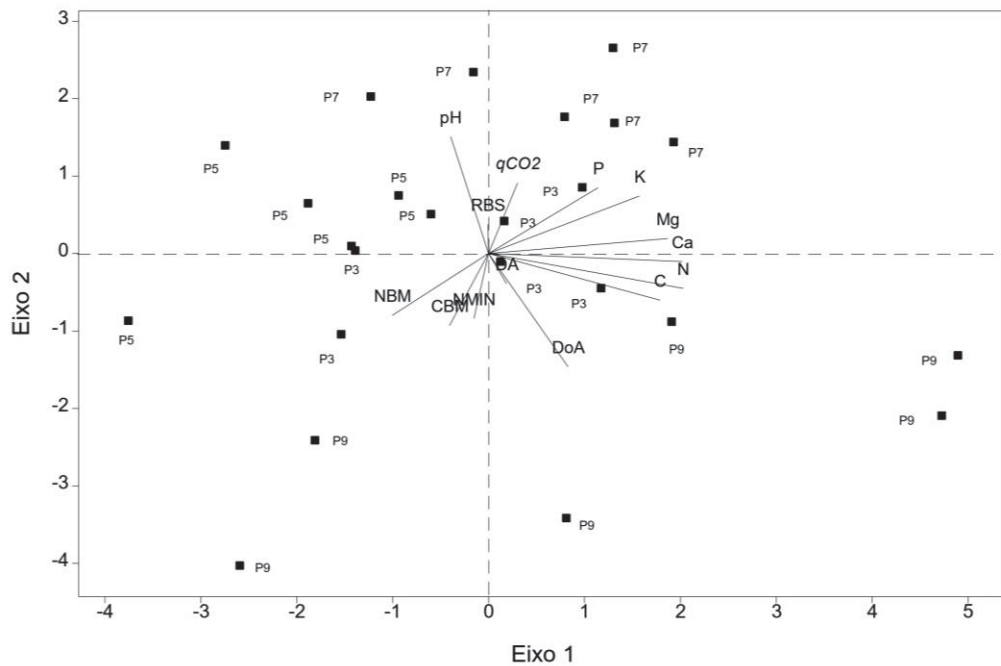
	Argila	C	N	pH	Ca	Mg	K	P
Nmin	-0,379	0,206	0,009	-0,190	-0,654	-0,478	0,684*	0,265
CBM	-0,530	0,778*	0,632	0,089	-0,278	-0,195	0,081	0,537
NBM	-0,473	0,339	0,257	0,225	-0,060	0,316	0,005	0,064
RBS	-0,432	0,540	0,657	0,659	0,672*	0,659	-0,420	0,306
qCO ₂	0,025	-0,320	-0,154	0,375	0,573	0,426	-0,405	-0,284

Pares de variáveis com coeficiente de correlação positivos e valores ($p < 0,05$) tendem a aumentar juntos. Pares com coeficiente de correlação negativo e valores ($p < 0,05$), uma das variáveis tende a diminuir enquanto a outra aumenta. Pares com valores ($p > 0,05$) não há relação significativa entre as duas variáveis. * = significativo.

Os resultados da análise de componentes principais (ACP) mostraram que as variáveis microbiológicas, químicas, físicas e fitossociológicas se associaram conforme a fisionomia vegetal dos ecossistemas, ou seja, houve variação nos dados de acordo com as características vegetais e edafoclimáticas das localidades de

estudo (RNG, Cerrado e PNSJ). Na RNG (Floresta Ombrófila Densa), os três tipos de fisionomias florestais analisadas (FOD de Terras Baixas, FOD Submontana e FOD Montana), tiveram comportamentos dispersos no conjunto de dados da ACP, ou seja, as parcelas de uma mesma fisionomia se agruparam; mas não houve uma direção fortemente relacionada aos vetores dos atributos analisados. Neste ecossistema, as CPs 1 e 2 explicaram 55% da variação dos dados analisados. Na CP1 os autovetores mais associados foram C, N, Ca, Mg, K, P e DoA. Enquanto na CP2 ocorreu mais associação para pH, RBS e qCO_2 (FIGURA 34).

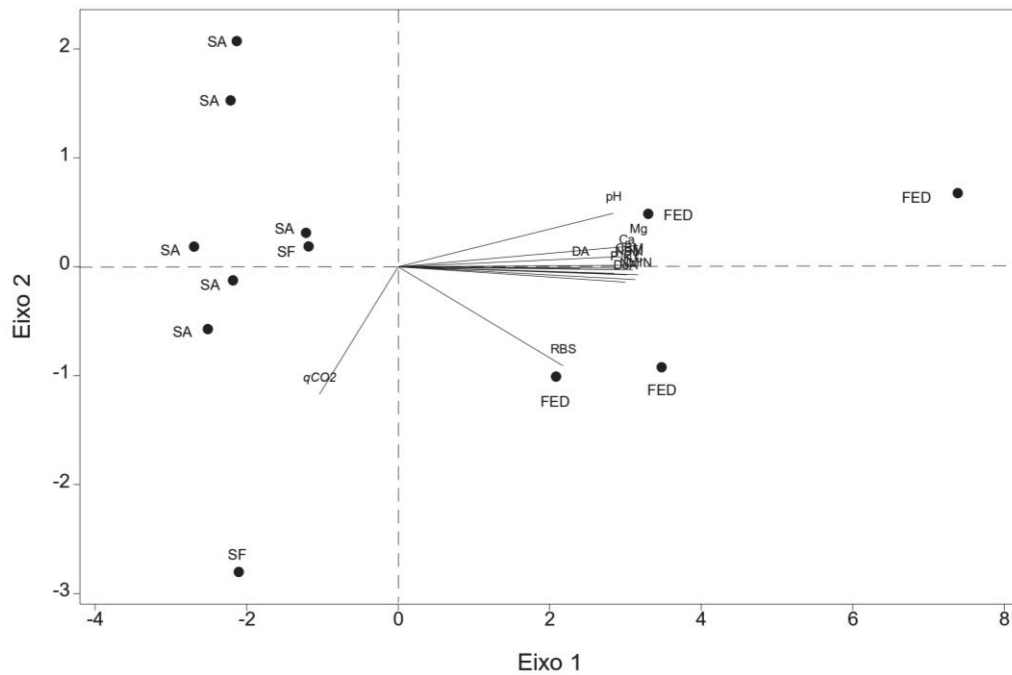
FIGURA 34 – Análise de componentes principais (ACP) dos atributos do solo e da vegetação na Reserva Natural Guaricica, Paraná.



Nas fisionomias vegetais do Cerrado as CPs 1 e 2 explicaram 77% da variação dos dados, e somente a CP1 explicou 76% desta variação. Com exceção do qCO_2 , todas as variáveis tiveram grande associação com a CP1 (CBM, NBM, RBS, pH, Ca, Mg, K, P, C, N, DA e DoA). É possível observar que os grupamentos se dividiram em cada eixo principal. O eixo 1 teve maior associação com a Floresta Estacional Decidual, enquanto o eixo 2, teve forte relação com as áreas savânicas, tanto a Savana Arborizada quanto a Savana Florestada. No entanto, apenas o qCO_2 teve associação com a CP2, enquanto na CP1, todos os outros atributos do solo

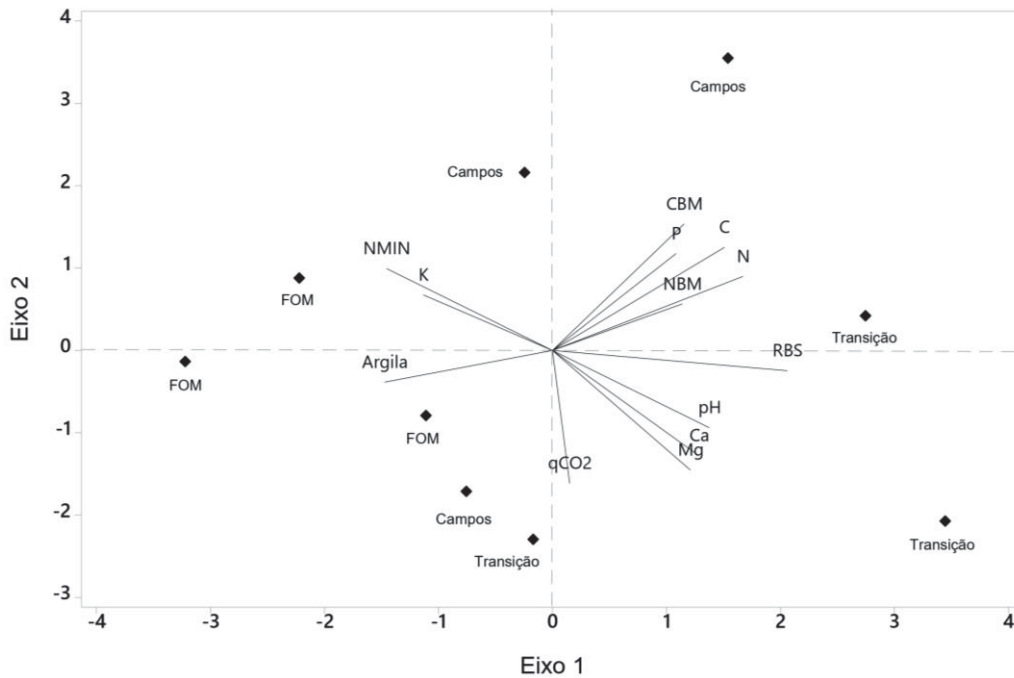
(químicos e microbiológicos) e os atributos fitossociológicos se associaram com a Floresta Estacional Decidual (FIGURA 35).

FIGURA 35 – Análise de componentes principais (ACP) dos atributos do solo e da vegetação nas áreas de Cerrado, Bahia.



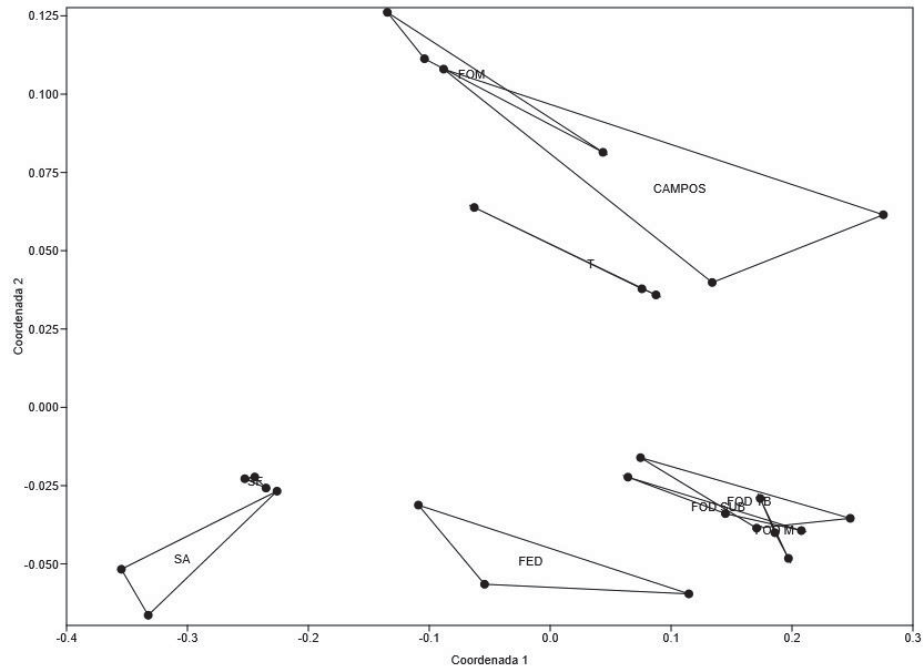
No Parque Nacional de São Joaquim as CPs 1 e 2 explicaram 88% da variação dos dados. Para a CP1, os autovalores explicaram 49% da variação dos dados, e os autovetores mais associados foram RBS, N e C, resultando em associação direta. No entanto, os ecossistemas do PNSJ não apresentaram um comportamento de agrupamento nas parcelas analisadas, pois, na CP1 se encontram parcelas de FOM, Campos de Altitude e transição. A CP2 explicou 39% da variação de dados, e foi influenciada principalmente por CBM, C, P e N. Na FIGURA 36 é possível observar que no PNSJ, as áreas analisadas não tiveram ordenação definida conforme as fisionomias, e os atributos do solo também não seguiram um padrão estabelecido de acordo com a parcela analisada.

FIGURA 36 – Análise de componentes principais (ACP) dos atributos do solo no Parque Nacional de São Joaquim, Santa Catarina.



A análise da relação entre os atributos microbiológicos e os ecossistemas estudados foi realizada através do escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS). O objetivo foi avaliar comparativamente se os atributos microbiológicos atuam de maneira semelhante nas fisionomias vegetais dos ecossistemas de estudo. A ordenação pelo NMDS, com a composição dos atributos microbiológicos (Nmin, CBM, NBM, RBS e qCO_2), gerou associação em quatro áreas principais. A FOM, Campos de Altitude e transição FOM/Campos de Altitude resultaram em uma área dos dois eixos de coordenada; a FOD de Terras Baixas, FOD Submontana e FOD Montana se associaram em outra área do gráfico; a Savana Arborizada e a Savana Florestada em outro campo; e a Floresta Estacional Decidual, apesar de pertencer ao ecossistema de Cerrado, se distanciou das outras duas áreas savânicas. O teste de Monte Carlo ($p < 0,05$) foi utilizado com o índice de similaridade de Bray-Curtis, para avaliar o conjunto de atributos microbiológicos dentro de cada par; e o teste demonstrou que as áreas estatisticamente diferentes foram: Floresta Ombrófila Densa Montana x Savana Arborizada; Savana Arborizada x transição FOM/Campos de Altitude; e FOM x FOD de Terras Baixas (FIGURA 37 e TABELA 24).

FIGURA 37 – Ordenação por escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) da relação de cinco atributos microbiológicos do solo com as fisionomias vegetais de quatro ecossistemas brasileiros (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Campos de Altitude e Cerrado).



FODTB = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas; FODS = Floresta Ombrófila Densa Submontana; FODM = Floresta Ombrófila Densa Montana; SA = Savana Arborizada; FED = Floresta Estacional Decidual; SF = Savana Florestada; FOM = Floresta Ombrófila Mista; Tran = transição FOM/Campos de Altitude; Campos = Campos de Altitude.

TABELA 24 – Análise par a par do escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) da relação entre cinco atributos microbiológicos do solo com fisionomias vegetais de quatro ecossistemas brasileiros (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Campos de Altitude e Cerrado).

	FODTB	FODS	FODM	SA	FED	SF	FOM	Tran	Campos
FOD TB		0,802	0,311	0,075	0,226	0,094	0,047*	0,066	0,556
FOD S	0,802		0,283	0,094	0,207	0,103	0,141	0,084	0,330
FOD M	0,311	0,283		0,047*	0,141	0,132	0,132	0,075	0,084
SA	0,075	0,094	0,047*		0,103	0,358	0,150	0,047*	0,160
FED	0,226	0,207	0,141	0,103		0,122	0,169	0,207	0,198
SF	0,094	0,103	0,132	0,358	0,122		0,122	0,150	0,132
FOM	0,047*	0,141	0,132	0,150	0,169	0,122		0,217	0,217
Tran	0,066	0,084	0,075	0,047*	0,207	0,150	0,217		0,367
Campos	0,556	0,330	0,084	0,160	0,198	0,132	0,217	0,367	

FODTB = Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas; FODS = Floresta Ombrófila Densa Submontana; FODM = Floresta Ombrófila Densa Montana; SA = Savana Arborizada; FED = Floresta Estacional Decidual; SF = Savana Florestada; FOM = Floresta Ombrófila Mista; Tran = transição FOM/Campos de Altitude; Campos = Campos de Altitude. Pares de variáveis com valor de $p < 0,05$; há diferenças significativas entre as fisionomias vegetais. * = significativo.

6.6 DISCUSSÃO

6.6.1 Mineralização do nitrogênio

A mineralização do nitrogênio mostrou cinética semelhante para todos os ecossistemas analisados (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Campos de Altitude e Cerrado), ou seja, os picos de mineralização ocorreram na segunda e/ou terceira extração de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$, entre 15 e 30 dias após a incubação das amostras, e diminuiu de maneira gradativa até a última extração do período de incubação. Outros estudos de mineralização do nitrogênio em ecossistemas do Brasil, mostraram comportamento similar (CAMARGO et al., 1997; GONÇALVES et al., 2001; YAGI et al., 2009). A maior quantidade de N mineralizado nos períodos iniciais da incubação está associada à mineralização da parte mais lábil da MOS (CAMARGO et al., 1997; MÜLLER, 2016). Ao analisar separadamente cada ecossistema, observam-se diferenças expressivas nos valores médios dos picos de mineralização; nas áreas de Cerrado o pico foi de 10 mg N kg⁻¹ solo, nas

parcelas de Floresta Estacional Decidual (FIGURA 30a). Nas parcelas de Floresta Ombrófila Densa, o pico de mineralização de N ficou na média de 25 mg N kg⁻¹ solo (FIGURA 20), enquanto na Floresta Ombrófila Mista Altomontana, o pico de N mineralizado foi próximo a 80 mg kg⁻¹ solo; e nos Campos de Altitude, os valores ficaram em torno de 60 mg kg⁻¹ solo (FIGURA 25).

Para o nitrogênio mineral acumulado, o Cerrado foi o ecossistema que apresentou as maiores diferenças entre suas formações vegetais, o grupamento II, formado por parcelas de Floresta Estacional Decidual, foi significativamente superior em relação às savanas Arborizada e Florestada (FIGURA 30b). Ao final do ensaio, os teores de N mineral acumulado nas formações vegetais do Cerrado, variaram entre 20 e 35 mg N kg⁻¹ solo. Estes resultados estão de acordo com López-Poma et al. (2020), que na camada superficial do solo encontraram média de 28 mg kg⁻¹ solo, em áreas de Cerrado nativo do estado de São Paulo. O estudo mostrou resultados com tendências similares ao nosso, ou seja, foram em solos sob FED que foram obtidos os maiores valores médios de N mineral acumulado, pois, as características de composição e estrutura da biomassa florestal da FED favoreceram a ciclagem de nutrientes e a atividade microbológica nesta fisionomia vegetal, quando comparadas as áreas de savana do cerrado (CARNEIRO et al., 2009; LÓPEZ-POMA et al., 2020; TREML et al., 2022). É importante observar que nas áreas de FED o solo apresentou maior fertilidade química do que nas áreas savânicas (TABELA 14).

Nos ecossistemas de FOD, FOM e Campos de Altitude, não foram identificadas diferenças significativas para o N mineral acumulado entre as formações vegetais analisadas. Na FOD, os valores médios de N mineral acumulado ficaram entre 70 e 100 mg N kg⁻¹ solo, não variando significativamente entre as parcelas. Müller (2016) em estudo sob Floresta Ombrófila Densa no litoral paranaense, encontrou maiores valores médios de N_{min} em solos sob indivíduos de *Inga edulis*. Apesar de não nodular, algumas espécies arbóreas da família Fabaceae são caracterizadas pelo potencial de favorecer a atividade de microrganismos no solo (BROUGHTON et al., 2006; RASCIO e LA ROCCA, 2013). Em nosso estudo, as diferenças mínimas entre as quatro parcelas (P3, P5, P7 e P9) quanto ao N mineralizado podem estar associadas às pequenas diferenças existentes na estrutura das florestas; e também nas características químicas dos solos. Os valores de importância (APÊNDICES 1 a 4) das espécies em todas as parcelas de estudo são baixos e não se observa a predominância de uma espécie florestal, o que

caracteriza florestas em estágio sucessional médio a avançado. Além disso, os maiores índices de valor de importância foram para as espécies *Psychotria nuda* e *Euterpe edulis*, conhecidas por indicarem florestas em estágio avançado de sucessão (LIEBSCH et al., 2007). Os solos se caracterizam por uma elevada acidez e baixa saturação por bases, além de teores baixos de P; e com mínimas diferenças entre as quatro áreas de estudo (TABELA 12).

Na Floresta Ombrófila Mista Altomontana, os valores médios foram próximos a 250 mg kg^{-1} solo; e nos Campos de Altitude ficaram em torno de 200 mg kg^{-1} solo de N mineral acumulado. No estudo de Gonçalves et al. (2001), foram encontrados valores de 345 mg kg^{-1} solo no ensaio de Nmin em Floresta Ombrófila Mista Submontana, no sul do estado de São Paulo. A temperatura e a umidade são fatores que interferem diretamente na microbiota do solo, e as florestas de clima subtropical e temperado são conhecidas pela acumulação de matéria orgânica no solo, devido a uma taxa de decomposição mais lenta em função das baixas temperaturas (PRIMIERY et al., 2017; ZHAO e LI, 2017). Manirakiza et al. (2020) encontraram valores médios de 200 mg N kg^{-1} solo de N mineral acumulado aos 60 dias de incubação, em solos ricos em MOS, coletados em áreas com vegetação natural na província de Quebec, Canadá. Solos com características húmicas de localidades com baixas temperaturas, quando incubados, tendem a favorecer o processo de mineralização da MOS, devido à temperatura e à umidade constante durante o período de incubação das amostras (COSTA et al., 2020; YAGI et al., 2009). Portanto, a incubação favoreceu o aumento da atividade de microrganismos mineralizadores.

6.6.2 Carbono da biomassa microbiana

O carbono da biomassa microbiana do solo mostrou tendência similar ao N mineralizado nos quatro ecossistemas; o CBM foi o atributo microbiológico que apresentou as maiores diferenças estatísticas entre as formações vegetais de cada ecossistema. Para as áreas de Cerrado, o CBM foi estatisticamente diferente nos três grupamentos, na Floresta Estacional Decidual (grupamento II), o valor médio foi de 800 mg C kg^{-1} solo, enquanto nas savanas Arborizadas e Florestada (grupamento I e III), os valores encontrados foram entre 300 e 400 mg C kg^{-1} solo, respectivamente. Estes valores são semelhantes a outros estudos realizados em

vegetação de Cerrado (ARAGÃO et al., 2020; MAIA et al., 2021). Silva et al. (2010) encontraram valores médios de 900 mg C kg⁻¹ solo na camada 0-10 cm em Cerrado nativo, e estes valores de CBM, foram notadamente maiores, quando comparados a outros sistemas de uso do solo no Cerrado, como, por exemplo, em sistemas agrícolas. Parte dos resultados foi atribuída à deposição de resíduos orgânicos e grande quantidade de raízes oriundas da Floresta Estacional Decidual do Cerrado, o que resultou em maior umidade retida no solo, e conseqüentemente, estimulou a manutenção e a atividade da microbiota do solo (CARNEIRO et al., 2009; CHEN e XIAO, 2023).

Na Floresta Ombrófila Densa, o CBM teve os maiores valores médios dentre os quatro ecossistemas de estudo, no entanto, sem diferenças estatísticas entre formações florestais de FOD. Os valores variaram entre 1300 e 1800 mg C kg⁻¹ solo na camada 0-10 cm. Tulio et al. (2022) encontraram valores médios entre 1155 e 1400 mg C kg⁻¹ solo para o CBM em florestas de Mata Atlântica; e relacionaram os altos teores de carbono microbiano com a conservação da matéria orgânica do solo, pois a manutenção de espécies nativas favoreceu os maiores valores de CBM. No estudo de Bianchin (2017), com amostras de solo frescas coletadas na profundidade de 0-5 cm, foi identificada diferença significativa para o CBM entre a área P9 (com valores médios de 682 mg C kg⁻¹ solo) e as áreas P3, P5 e P7 (com valores entre 450 e 507 mg C kg⁻¹ solo).

Na Floresta Ombrófila Mista Altomontana e nos Campos de Altitude, os resultados mostraram que o ecossistema de Campos de Altitude foi estatisticamente diferente da Floresta Ombrófila Mista para CBM, e os valores foram na média de 1300 e 700 mg C kg⁻¹ solo, para Campos de Altitude e FOM respectivamente. Primieri et al. (2017) ao analisarem a atividade microbiana em áreas de FOM e campos nativos no município de Campo Belo do Sul, no estado de Santa Catarina, observaram que nos solos com vegetação de campos, os valores foram numericamente superiores à Floresta Ombrófila Mista, 1354 e 1333 mg C kg⁻¹ solo, respectivamente. Apesar das áreas do Parque Nacional de São Joaquim possuírem solos rasos, o horizonte A é fundamental para a conservação da microbiota e eficiente ciclagem de nutrientes e carbono (COSTA et al., 2020; PRIMIERI et al., 2017). Nas áreas de campos, a vegetação nativa é de predominância de espécies gramíneas que produzem grande quantidade de biomassa de raízes. A lenta

decomposição desta biomassa contribui para a formação de espessos horizontes A, ricos em matéria orgânica, que favorecem a microbiota do solo.

6.6.3 Nitrogênio da biomassa microbiana

O nitrogênio da biomassa microbiana mostrou diferença significativa apenas nas fisionomias de Cerrado. E, assim como para o CBM, o grupamento II (Floresta Estacional Decidual) foi a fisionomia vegetal com os maiores valores médios de NBM. Na Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, os valores variaram minimamente entre as formações vegetais dentro de cada ecossistema, e não houve diferença mínima significativa entre as fisionomias vegetais.

Os resultados aqui observados indicam este atributo microbiológico como o de menor sensibilidade para caracterizar diferenças da atividade microbiológica do solo associadas aos diferentes ambientes estudados.

6.6.4 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo foi o único atributo microbiológico que mostrou diferenças significativas nos quatro ecossistemas.

Nas áreas do Parque Nacional de São Joaquim, os maiores valores observados foram para as parcelas de transição Floresta Ombrófila Mista/Campos de Altitude, onde foram encontradas taxas de 5 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹. As menores taxas de RBS foram observadas na FOM e Campos de Altitude. Baixas taxas de RBS e altos valores de CBM podem indicar que os campos estão perdendo menos carbono na forma de CO₂ em relação à área de FOM e transição, ou seja, nos Campos de Altitude do PNSJ, as gramíneas podem estar incorporando com mais efetividade o carbono na sua biomassa microbiana, em função da rápida regeneração vegetal, quando comparados as formações de transição e FOM (PRIMIERY et al., 2017).

Na Reserva Natural da Guaricica (FOD), as taxas variaram entre 4,0 e 4,5 mg C-CO₂ kg⁻¹ solo h⁻¹; e a parcela P5 mostrou o maior valor médio. No entanto não houve distinção clara entre as formações de FOD de Terras Baixas, Submontana ou Montana para a RBS. No estudo de Tulio et al. (2022), não foram encontradas

diferenças significativas em áreas nativas de Mata Atlântica para a respiração basal do solo.

No Cerrado, como já observado para outros atributos microbiológicos (Nmin, CBM e NBM), o grupamento II (Floresta Estacional Decidual) mostrou os maiores valores médio de RBS, com valores próximos a $2,5 \text{ mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$. Silva et al. (2010) observaram valores similares para RBS em Cerrado nativo, inclusive maiores valores em relação às áreas de Cerrado com sistemas agrícolas. A maior atividade respiratória microbiana pode ser encontrada em sistemas de manejo menos intensos (HUNGRIA et al., 2009; SILVA et al., 2010). Neste estudo, a menor atividade respiratória ocorreu na Savana Arborizada, neste caso, a formação com menor diversidade de espécies arbóreas, e com grau de regeneração menos avançado em relação à Savana Florestada e Floresta Estacional Decidual.

6.6.5 Quociente metabólico

Quanto ao quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), não foi constatado efeito significativo das formações vegetais de Floresta Ombrófila Densa e de Cerrado. Apenas na análise entre Floresta Ombrófila Mista e Campos de Altitude, houve diferença, sendo a área de transição FOM/Campos de Altitude, com os maiores valores de $q\text{CO}_2$ ($5,3 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$), enquanto os Campos de Altitude tiveram os menores valores médio ($3,4 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$) e a Floresta Ombrófila Mista, valor médio de $4,3 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBM h}^{-1}$. Estes valores sugerem que a área de transição apresenta biomassa com menor eficiência em relação aos campos e a FOM (KASCHUK et al., 2010); e os resultados estão de acordo com os valores encontrados por Primieri et al. (2017) em ecossistemas nativos de campos e Floresta Ombrófila Mista no estado de Santa Catarina.

6.6.6 Influência dos parâmetros químicos, físicos, e da vegetação com os atributos microbiológicos do solo

Os atributos microbiológicos do solo se correlacionaram com os atributos físicos, químicos e fitossociológicos, de maneira diferenciada, conforme cada ecossistema.

Na Floresta Ombrófila Densa, a única correlação significativa foi entre a mineralização de N no solo e o índice fitossociológico de dominância absoluta (Nmin x DoA). No PNSJ foi encontrada correlação significativa entre os atributos CBM x C, Nmin x K, RBS x Ca. Já, no Cerrado, foram identificadas várias correlações dos atributos microbiológicos com atributos químicos, sendo as principais: Nmin x C, Nmin x N, Nmin x P, Nmin x Mg, CBM x C, CBM x N, CBM x P, CBM x Mg, NBM x N e NBM x C. Bargali et al. (2018) também identificaram fortes correlações da biomassa microbiana com outras características físicas e químicas do solo, especialmente a relação do CBM com os teores de C, N e P do solo. A disponibilidade de nutrientes é afetada diretamente por microrganismos do solo; e C, N e P estão entre os principais elementos relacionados com a atividade microbiológica devido à ciclagem de nutrientes (BALOTA et al., 2013; KEYS et al., 2018). Por outro lado, a biomassa microbiana do solo também é influenciada pela composição florística do ecossistema (CARDOSO e ANDREOTE, 2016).

No estudo de Bianchin (2017) na RNG, foi relatada a influência da fisionomia florestal, somente na biomassa microbiana da camada 0-5 cm, sendo atribuída a algumas diferenças para os atributos do solo (teores um pouco mais elevados de Ca e Mg), mas também decorrentes de diferenças na qualidade da serapilheira depositada pela vegetação que era diferenciada na área de maior altitude. As pequenas diferenças, ou a ausência de diferenças entre as florestas em estudo, podem ser explicadas pelo fato delas já se encontrarem em fase sucessional intermediária ou avançada. Assim, os atributos do solo não estão sendo fortemente influenciados pela estrutura florestal, pois, o processo de sucessão após o abandono parece ter estabilizado a matéria orgânica do solo na camada superficial, resultando em pouca variação na microbiologia do solo entre os diferentes estágios sucessionais da RNG (DICKOW et al., 2012; MARQUES et al., 2023).

Nas parcelas de Cerrado foi encontrado o maior número de correlações positivas entre os atributos microbiológicos e os atributos químicos e fitossociológicos. De maneira geral, Nmin, CBM e NBM mostraram estreitas correlações com os teores de nutrientes do solo, principalmente com C, N, P, além de boas correlações com Ca, Mg, K e os atributos fitossociológicos DA e DoA. Neste ecossistema, os atributos microbiológicos foram influenciados tanto pela classe de solo quanto pela composição florística dos grupamentos do ecótono de Cerrado. Treml et al. (2022) relataram que as fitofisionomias destas áreas possuíam

indicativos de relação com fatores abióticos e pedogenéticos; e os resultados aqui obtidos mostraram que a microbiologia do solo também teve relação direta com a vegetação e as classes de solo nos grupamentos de Cerrado. A ACP confirmou a relação dos atributos com as parcelas de FED; com exceção do quociente metabólico, todas as variáveis químicas, microbiológicas e fitossociológicas foram agrupadas com as áreas de floresta no Cerrado.

No PNSJ, as correlações foram menos numerosas, se restringindo a $N_{min} \times K$, $CBM \times C$ e $RBS \times Ca$. Nas áreas de campos de altitude e transição FOM/campos foram observados os maiores valores médios dos atributos químicos e microbiológicos do solo, além disso, a ACP mostrou que os principais atributos do solo tiveram relação direta com campos de altitude e áreas de transição. No estudo de Primieri et al. (2017), foram observados valores de atributos químicos e microbiológicos iguais ou maiores em áreas de campos, quando comparadas a FOM no estado de Santa Catarina. A relação positiva entre carbono da biomassa microbiana e carbono total também foi encontrada Samuelson et al. (2009) que identificaram que a respiração no solo estava fortemente correlacionada com o teor de carbono. Barreto-Garcia et al. (2020), em florestas da caatinga, observaram que a textura do solo teve relação com C e N da biomassa microbiana do solo; e a ACP associou o teor de silte com a biomassa microbiana.

Na maioria dos ecossistemas, os fatores climáticos e as características físicas e químicas do solo são importantes na atividade e estrutura microbiana (SHEN et al., 2021). A ACP mostrou que CBM e NBM foram mais relacionados com os teores de C, N e P, enquanto o pH, Ca e Mg ficaram mais associados a RBS. A influência da atividade da microbiota do solo também foi refletida nos atributos químicos, com os maiores valores médios encontrados nas parcelas sob campos de altitude e transição.

A análise de componentes principais mostrou especificidade nas formações vegetais de cada ecossistema, em relação aos atributos do solo e fitossociológicos.

Na RNG os principais atributos do solo foram associados às parcelas de FOD Montana (P9). Bianchin (2017) também encontrou resultados similares em análise de estoque de nutrientes da serapilheira da FOD Montana; e esta fisionomia se diferenciou das demais na RNG (FOD de Terras Baixas e FOD Submontana).

Na área de Cerrado, a distribuição dos atributos do solo e fitossociológicos seguiram o mesmo comportamento, principalmente na CP1, onde com exceção do

qCO_2 , todos os parâmetros analisados seguiram na direção da Floresta Estacional Decidual. Treml et al. (2022) estudaram a similaridade das composições florísticas e a relação com os atributos químicos do solo no Cerrado e encontraram diferenciação entre as fisionomias, associadas aos fatores edáficos e relevo do solo, além de maior aporte de nutrientes no sentido FED>SF>SA. Os resultados, do presente trabalho indicam que os maiores valores para os atributos microbiológicos se associaram principalmente com as parcelas de FED, em função das características do solo e da vegetação.

No Parque Nacional de São Joaquim, a ACP mostrou algumas relações entre os atributos microbiológicos e os atributos físicos e químicos do solo. Vale ressaltar que as parcelas se encontram em relevo acidentado e com altitudes que variam entre 1450 e 1680 metros, com heterogeneidade no tipo de solo. No estudo de Costa et al. (2020) sobre técnicas de espectroscopia para predição de textura e carbono do solo, os autores relataram que houve grande amplitude e variação nos resultados em função das diferenças físicas e químicas no solo das parcelas do transecto de pesquisa do PNSJ. Os resultados da biomassa microbiana do solo evidenciam a variabilidade das parcelas, com coeficiente de variação superior a 80%. Apesar da variação das parcelas, vale ressaltar que o módulo de pesquisa está inserido em uma área em processo de recuperação da ação antrópica, desde 1961, quando foi criado o PNSJ (COSTA, 2020). De modo geral, os resultados mostraram que a área de maior vulnerabilidade foi a transição FOM/Campos de Altitude. As parcelas de transição situam-se nas bordas da FOM, e fazem parte da área mais externa da floresta, na divisa com as parcelas de Campos de Altitude, portanto, são áreas com histórico de incêndios florestais (BLANCO, 2021); e no longo prazo resultam em perturbações na atividade microbiana (SINGH et al., 2017; THOMAZINI et al., 2015).

O teste de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), com uso de matriz com os cinco atributos microbiológicos do solo, mostrou ordenamento entre as áreas analisadas por ecossistema (FIGURA 37). O índice de similaridade de Bray-Curtis (TABELA 24), evidenciou que as áreas estatisticamente diferentes foram: Floresta Ombrófila Densa Montana x Savana Arborizada; Savana Arborizada x transição FOM/Campos de Altitude; e FOM x FOD de Terras Baixas. Joshi e Garkoti (2023) avaliaram o efeito da vegetação nas propriedades químicas, físicas e microbiológicas em florestas com diferentes relevos na Índia e os resultados

mostraram variações nos atributos microbiológicos entre as áreas florestais, indicando que as florestas com maiores densidades apresentaram maiores associações com a biomassa microbiana do solo. No presente trabalho, a ordenação da análise de NMDS, mostrou a diferenciação entre os ecossistemas e fisionomias vegetais, de acordo com a composição dos atributos microbiológicos; e os resultados indicam que os atributos microbiológicos são influenciados diretamente pela classe de solo e pela composição florística, sendo que em cada fitofisionomia foi observada a existência de um ou mais atributos microbiológicos do solo associados com as características edáficas e da vegetação, de acordo com o ecossistema.

6.7 CONCLUSÕES

Os atributos microbiológicos do solo foram influenciados de maneiras diferenciadas em cada um dos ecossistemas. Na Reserva Natural Guaricica, a RBS foi o atributo que diferenciou a microbiota do solo em formações florestais de Terras Baixas, Submontana e Montana. No Parque Nacional de São Joaquim, o CBM e a RBS explicaram a diferença na microbiologia em solos sob Floresta Ombrófila Mista Altomontana, áreas de transição e Campos de Altitude. Enquanto, no Cerrado, as áreas de Floresta Estacional Decidual, Savana Florestada e Savana Arborizada, foram diferenciadas pelos atributos: Nmin, CBM, NBM e RBS.

As características do solo e as fisionomias vegetais do Cerrado apresentaram estreita correlação com os atributos microbiológicos, enquanto na FOD, na FOM e nos Campos de Altitude, as correlações foram menos expressivas.

Os atributos microbiológicos apresentaram associação espacial direta com as fisionomias vegetais de cada ecossistema. Os parâmetros físicos e químicos do solo e fitossociológicos mostraram boas correlações com os atributos microbiológicos, especialmente com a biomassa microbiana do solo.

6.8 REFERÊNCIAS

ARAGÃO, O. B. S.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; CAPUTO, P. S. C.; RUFINI, M.; CARVALHO, G. R.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, F. M. S. Microbiological

indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, n. 1, p. 106205, 2020.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. **Enzimas e seu papel na qualidade do solo**. Tópicos em Ciência do Solo, 1 ed., v. 8 , Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 2-49.

BARGALI, M.; MANRAL, V.; PADALIA, K.; BARGALI, S. S.; UPADHYAY, V. P. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India. **Catena**, v. 171, p. 125-135, 2018.

BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BATISTA, S. G. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; PAULA, A.; BATISTA, W. C. A. Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, n. 1, p. 118790, 2021.

BHERING, S. B. et al. **Mapa de solos do Estado do Paraná - escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2007.

BIANCHIN, J. E. **Dinâmica da serapilheira e atributos microbiológicos do solo em um gradiente altitudinal de Floresta atlântica**. 168 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BITTENCOURT, F. **Fungos poliporoides das vegetações de altitude do Parque Nacional de São Joaquim, Urubici/SC**. 149 p. Dissertação (Mestrado em Biologia de Fungos, Algas e Plantas) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BLANCO, G. D. O Parque Nacional de São Joaquim na agenda 2030. In: OMENA; BACCA. (Org.). **O parque das memórias infinitas: 60 anos de histórias do Parque Nacional São Joaquim**. Urubici: Cinco Continentes, 2021.

BOMFIM, B.; SILVA, L. C. R.; PEREIRA, R. S.; GATTO, A.; EMMERT, F.; HIGUCHI, N. Litter and soil biogeochemical parameters as indicators of sustainable logging in Central Amazonia. **Science of the Total Environment**, v. 714, n. 1, p. 136780, 2020.

BRITO, G. S.; BAUTISTA, S.; LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R. Soil labile organic carbon pools and dynamics of Brazilian woodland savanna (cerradão) under different land uses. **Biogeochemistry**, v. 144, n. 1, p. 31-46, 2019.

BROUGHTON, W. J.; HANIN, M.; RELIÉ, B.; KOPCIŃSKA, J.; GOLINOWSKI, W.; SIMSEK, S.; OJANEN-REUHS, T.; REUHS, B.; MARIE, C.; KOBAYASHI, H.; BORDOGNA, B.; LE QUÉRE, A.; JABBOURI, S.; FELLAY, R.; PERRET, X.; DEAKIN, W. J. Flavonoid-Inducible modifications to Rhamnan O Antigens are necessary for *Rhizobium* sp. Strain NGR234-Legume symbiosis. **Journal of Bacteriology**, v. 188, p. 3654-3663, 2006.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. 1, p. 105-125, 2018.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 575-579, 1997.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221p.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 631-637, 2009.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes

sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CHEN, C.; CHEN, X.; CHEN, H. Y. H. Mapping N deposition impacts on soil microbial biomass across global terrestrial ecosystems. **Geoderma**, v. 433, p. 116429, 2023.

CHEN, C.; XIAO, W. The global positive effect of phosphorus addition on soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 176, p. 108882, 2023.

CHEN, J.; XIAO, W.; ZHENG, C.; ZHU, B. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107708, 2020.

COSTA, J. J. F. **Estimativa de propriedades do solo por espectroscopia Vis-Nir-Swir e variáveis ambientais no sul do Brasil**. 125 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

COSTA, J. J. F.; GIASSON, E.; SILVA, E. B.; COBLINSKI, J. A.; TIECHER, T. Use of color parameters in the grouping of soil samples produces more accurate predictions of soil texture and soil organic carbon. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, p. 105710, 2020.

CROWTHER, T. W.; VAN DEN HOOGEN, J.; WAN, J.; MAYES, M. A.; KEISER, A. D.; MO, L.; AVERILL, C.; MAYNARD, D. S. The global soil community and its influence on biogeochemistry. **Science**, v. 365, n. 6455, eaav0550, 2019.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; ALMEIDA, J. A.; CURCIO, G. R. Solos do Planalto das Araucárias. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Pedologia - Solos Dos Biomas Brasileiros**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2017. p. 597.

DICKOW, K. M. C.; MARQUES, R.; PINTO, C. B.; HÖFER, H. Produção de serapilheira em diferentes fases sucessionais de uma floresta subtropical secundária, em Antonina, PR. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 75-86, 2012.

DRIDI, I.; GUEDDARI, M. Field and laboratory study of nitrogen mineralization dynamics in four Tunisian soils. **Journal of African Earth Sciences**, v. 154, n. 1, p. 101-110, 2019.

ESPÍNDOLA, S. P.; BOBUL'SKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Impact of nitrogen additions on soil microbial respiration and temperature sensitivity in native and agricultural ecosystems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Biology**, v. 75, n. 1, p. 120-127, 2018.

GONÇALVES, A. S.; MONTEIRO, M. T.; GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 651-658, 2002.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 601-616, 2001.

GRECCHI, R. C.; BEUCHLE, R.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E.; ACHARD, F. Assessing land cover changes in the Brazilian Cerrado between 1990 and 2010 using a remote sensing sampling approach. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, p. 2860-2866, 2015.

GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; PAVÃO, E. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, n. 15, p. 4765-4780, 2015.

GUHR, A.; MARZINI, C.; BORKEN, W.; POLL, C.; MATZNER, E. Effect of water redistribution by two distinct saprotrophic fungi on carbon mineralization and nitrogen translocation in dry soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, n. 1, p. 380-387, 2016.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experimente with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, p. 288-296, 2009.

IAPAR. Instituto Agronômico do Paraná. **Monitoramento meteorológico do estado do Paraná. Medias históricas em estações do IAPAR**. Londrina, 2020 em: <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias Historicas](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas)>. Acesso em: 25 jun. 2021.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBRAHIM, M.; KHAN, A.; ANJUM; ALI, W.; AKBAR, H. Mulching techniques: An approach for offsetting soil moisture deficit and enhancing manure mineralization during maize cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. 1, p. 104631, 2020.

JANSSON, J. K.; HOFMOCKEL, K. S. Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, p. 35-46, 2020.

JOSHI, R. K.; GARKOTI, S. C. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya. **Catena**, v. 222, p. 106835, 2023.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1-13, 2010.

KEYS, K.; BURTON, D. L.; PRICE, G. W.; DUINKER, P. N. Forest floor chemistry and mineral soil ion exposure after surface application of alkaline-treated biosolids

under two white spruce (*Picea glauca*) plantations in Nova Scotia, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. 1, p. 208-221, 2018.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W; Gieger, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936. p. 1-44.

LI, H.; HAN, Y.; CAI, Z. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamics and model fitting. **Geoderma**, v. 115, p. 161-175, 2003.

LIEBSCH, D.; GOLDENBERG, R.; MARQUES, M. C. M. Florística e estrutura de comunidades vegetais em uma cronoseqüência de Floresta Atlântica no Estado do Paraná, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, n.4, p. 983-992, 2007.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOED, W. B.; GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, n. 1, p. 194-200, 2013.

LIMA, E. M. **Variação florístico-estrutural em duas pedosseqüências, em áreas de Cerrado, município de Formosa – Goiás**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R.; BRITO, G. S.; BAUTISTA, S. Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and *Eucalyptus* plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 1, p. 135397, 2020.

LU, T.; WANG, Y.; ZHU, H.; WEI, X.; SHAO, M. Drying-wetting cycles consistently increase net nitrogen mineralization in 25 agricultural soils across intensity and number of drying-wetting cycles. **Science of the Total Environment**, v. 710, n. 1, p. 135574, 2020.

MAGNUSSON, W. E.; LIMA, A. P.; LUIZÃO, R.; LUIZÃO, F.; COSTA, F. R.; CASTILHO, C. V. D.; KINUPP, V. F. RAPELD: a modification of the Gentry method

for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, v. 5, n. 2, p. 19-24, 2005.

MAIA, N. J. C.; CRUZ, M. C. P.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; MENEGATTO, L. S.; AUGUSTO, J. G.; MENDONÇA, G. G.; TERÇARIOL, M. C.; OLIVEIRA, J. G.; SIMILI, F. F. Integrated crop-livestock versus conventional systems: use of soil indicators to detect short-term changes during seasonal variation. **Bragantia**, v. 80, p. e5821, 2021.

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LUCE, M. S.; HAMEL, C.; ANTOUN, H.; KARAM, A. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to co-application of biochar and paper mill biosolids. **Applied Soil Ecology**, v. 142, n. 1, p. 90-98, 2019.

MARQUES, R.; LARSEN, J. G.; CATTARIN, A.; SILVEIRA, F. M. Biomass and nutrients in the forest-floor litter of second-growth brazilian atlantic forests. **Floresta**, v. 53, n. 1, p. 80-88, 2023.

MCKENZIE, J.; GOLDMAN, R. N. **The student edition of minitab for windows manual**. v.12, Softcover ed. Belmont: Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1999. 592p.

MÜLLER, F. **Floresta atlântica do sul do Brasil e diversidade microbiológica do solo sob essências florestais leguminosas**. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; BRUMATTI, A. V.; SANTOS, L. L.; SALES, L. C. Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal**, v. 41, n. 3, p. 603-611, 2018.

OLIVEIRA, R. A. C.; MARQUES, R.; MARQUES, M. Plant diversity and local environmental conditions indirectly affect litter decomposition in a tropical forest. **Applied Soil Ecology**, v. 134, n. 1, p. 45-53, 2019.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. H.; LISBOA, H. M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecosistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floram**, v. 24, p. e00110314, 2017.

RASCIO, N.; LA ROCCA, N. Biological nitrogen fixation. – In: ELIAS S. A. (ed.): Reference **Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Elsevier, Amsterdam, 2013. p. 412-419.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

RITZ, K.; BLACK, H. I. J.; CAMPBELL, C. D.; HARRIS, J. A.; WOOD, C. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. **Ecological Indicators**, v. 9, p. 1212-1221, 2009.

RODERJAN, C. V.; KUNIYOSHI, Y. S.; GALVÃO, F.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. **Ciência & Ambiente**, v. 24, p. 75-92, 2002.

ROMEO, F.; SETTINERI, G.; SIDARI, M.; MALLAMACI, C.; MUSCOLO, A. Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. **Forest Ecology and Management**, v. 465, n. 1, p. 118106, 2020.

SAMUELSON, L.; MATHEW, R.; STOKES, T.; FENG, Y.; AUBREY, D.; COLEMAN, M. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven years of irrigation and fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2431-2438, 2009.

SHEN, Y.; RYSER, E.; LI, H.; ZHANG, W. Bacterial community assembly and antibiotic resistance genes in the lettuce-soil system upon antibiotic exposure. **Science of The Total Environment**, v. 778, p. 146255, 2021.

SILVA, R. S.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SINGH, A. K.; KUSHWAHA, M.; RAI, A.; SINGH, N. Changes in soil microbial response across year following a wildfire in tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 391, p. 458-468, 2017.

SOUZA, A. G. V.; SILVA, G. G.; BESERRA, G. A.; SOUZA, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, V. D.; ROCHA FILHO, C. T.; SERAFIM, M. N.; SANTOS, L. C. S.; SANTOS, T. E. B.; VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3673, 2021.

SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, E. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2015.

TREML, L. M. **Vegetação e solo: estudo de caso em uma área de transição entre fisionomias no bioma Cerrado**. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

TREML, L. M.; CATTARIN, A.; MARQUES, R.; GALVÃO, F.; CRIVELLARI, L. B.; COUTINHO, V. M. Floristic similarity in a forest-savannah ecotone in western Bahia state, Brazil. **Floresta**, v. 52, n. 4, p. 475-483, 2022.

TULIO, R. H.; RACHWAL, M. F. G.; ZANATTA, J. A.; SILVA, K.; KASCHUK, G. Physical, chemical and microbiological soil attributes influence soil greenhouse gases fluxes in Atlantic Forest and pine (*Pinus taeda*) plantations in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 39, p. 183-197, 2022.

VALERA, C. A.; VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The role of environmental land use conflicts in soil fertility: a study on the Uberaba River basin, Brazil. **Science Total Environmental**, v. 562, p. 463-473, 2016.

VIANNA, L. F. N.; SILVA, E. B.; MASSIGNAM, A. M.; OLIVEIRA, S. N. Aplicação de descritores de heterogeneidade Ambiental na seleção de áreas para sistemas de parcelas amostrais: um estudo de caso para a determinação de rotspots potenciais de biodiversidade. **Geografia**, Rio Claro, v. 40, n. 2, p. 211-239, 2015.

WOICIECHOWSKI, T.; MARQUES, R. Produção de serapilheira e restituição de nutrientes em florestas secundárias do litoral paranaense. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 5, n. 2, p. 1-15, 2017.

WU, W.; ZHANG, C.; LIANG, X.; ZHU, C.; WANG, T.; ZHANG, J. Elevated CO₂ improved soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy. **Science Total Environmental**, v. 710, p. 136438, 2020.

YAGI, R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C. Mineralização potencial e líquida de nitrogênio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 385-394, 2009.

ZHAO, N.; LI, X. G. Effects of aspect-vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. **Catena**, v. 155, n. 1, p. 1-9, 2017.

ZILLI, J. E.; RUMJANEK, N. G.; XAVIER, G. R.; COUTINHO, H. L. C.; NEVES, M. C. P. Diversidade microbiana como indicador de qualidade do solo. **Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 3, p. 391-411, 2003.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos microbiológicos do solo se mostraram viáveis para explicar o efeito da fertilização mineral em sítios de *Pinus taeda* aos 18 anos de idade. O teor de argila e a matéria orgânica do solo foram estreitamente relacionados com os atributos microbiológicos do solo nos sítios de *Pinus taeda* do Paraná e Santa Catarina.

Nos sítios de plantações jovens de *Pinus taeda*, os atributos microbiológicos foram influenciados principalmente pela classe de solo, no entanto, foi constatado que o histórico de uso do solo e manejo florestal influenciaram na microbiologia do solo.

Os atributos microbiológicos do solo nos ecossistemas foram influenciados de diferentes formas, conforme às características edafoclimáticas e a fitofisionomia de cada ecossistema. A microbiologia do solo nas áreas de Cerrado na Bahia, apresentaram maior sensibilidade na diferenciação das fisionomias vegetais, comparadas as áreas de Mata Atlântica do Paraná e Santa Catarina (Floresta Ombrófila Densa, Mista e Campos de Altitude).

Carbono da biomassa microbiana e respiração basal do solo foram os atributos microbiológicos que melhor se correlacionaram com atributos químicos e/ou físicos do solo em todas as áreas de estudo. Os atributos microbiológicos do solo foram sensíveis para indicar diferentes classes de solo e diferentes tipos de vegetação.

8 REFERÊNCIAS

ABRAF - ASSOCIAÇÃO BRA SILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. ABRAF, Brasília: 2013.

ADAM, W. M.; RODRIGUES, V. S.; MAGRI, E.; MOTTA, A. C. V.; ZAMBON, L. M.; LIMA, R. L. D. Mid-rotation fertilization and liming of *Pinus taeda*: growth, litter, fine root mass, and elemental composition. **iForest**. v. 14, p. 195-202, 2021.

AGNELO, L.; LEONEL, L. P.; SILVA, N. B.; CANDELLO, F. P.; SCHNEIDER, J.; TONETTI, A. L. Effects of wastewater disinfectants on the soil: Implications for soil microbial and chemical attributes. **Science of The Total Environment**, v. 706, n. 1, p. 136007, 2020.

ALBAUGH, J. M.; BLEVINS, L. H.; ALLEN, L.; ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; STAPE, J. L.; RUBILAR, R. A. Characterization of foliar macro and micronutrient concentrations and ratios in loblolly pine plantations in the southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 34, n. 2, p. 53-64, 2010.

ALBAUGH, T. J.; FOX, T. R.; RUBILAR, R. A.; COOK, R. L.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Post thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology Management**, v. 396, p. 207-216, 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's Climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728. 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington: APHA, 1995.

ANDERSON, T.; DOMSCH, K. The metabolic quotient for CO₂ (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, p. 393-395, 1993.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 2039-2043, 2010.

ANGST, G.; MESSINGER, J.; GREINER, M.; HÄUSLER, W.; HERTEL, D.; KIRFEL, K.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEUSCHNER, C.; RETHEMEYER, J.; MUELLER, C. W. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 122, n. 1, p. 19-30, 2018.

ARAGÃO, O. B. S.; OLIVEIRA-LONGATTI, S. M.; CAPUTO, P. S. C.; RUFINI, M.; CARVALHO, G. R.; CARVALHO, T. S.; MOREIRA, F. M. S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. **Ecological Indicators**, v. 113, n. 1, p. 106205, 2020.

ASSIS JÚNIOR, S. J.; ZANUNCIO, J. C.; KASUYA, M. C. M.; COUTO, L.; MELIDO, R. C. N. Atividade microbiana do solo em sistemas agroflorestais, monoculturas, mata natural e área desmatada. **Árvore**, v. 27, n. 1, p. 35-41, 2003.

BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 63, n. 3, p. 301-309, 2015.

BALOTA, E. L.; NOGUEIRA, M. A.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; FAGOTTI, D. S. L.; MELO, G. M. P.; SOUZA, R. C.; MELO, W. J. **Enzimas e seu papel na qualidade do solo**. Tópicos em Ciência do Solo, 1 ed., v. 8, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 2-49.

BARGALI, M.; MANRAL, V.; PADALIA, K.; BARGALI, S. S.; UPADHYAY, V. P. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India. **Catena**, v. 171, p. 125-135, 2018.

BARRETO-GARCIA, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Carbon and nitrogen mineralization in soils under an eucalyptus plantation chronosequence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010.

BATISTA, A. H.; MOTTA, A. C. V.; REISSMANN, C. B.; SCHNEIDER, T.; MARTINS, I. L.; HASHIMOTO, M. Liming and fertilisation in *Pinus taeda* plantations with severe nutrient deficiency in savanna soils. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 37, n. 1, p. 117-125, Maringá, 2015.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D.; FERREIRA, C. A.; ANDRADE, G. C. **Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais**. Boletim de Pesquisa Florestal. EMBRAPA. n. 37, p. 99-106. Colombo, 1998.

BHERING, S. B. et al. **Mapa de solos do Estado do Paraná - escala 1:250.000**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2007.

BIANCHIN, J. E. **Dinâmica da serapilheira e atributos microbiológicos do solo em um gradiente altitudinal de Floresta atlântica**. 168 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

BIESEK, M. F. **Indicadores químicos e microbiológicos da qualidade do solo em agrossistemas e sistemas nativos na região dos campos gerais, Castro-PR**. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BITTENCOURT, F. **Fungos poliporoides das vegetações de altitude do Parque Nacional de São Joaquim, Urubici/SC**. 149 p. Dissertação (Mestrado em Biologia de Fungos, Algas e Plantas) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BLANCO, G. D. O Parque Nacional de São Joaquim na agenda 2030. In: OMENA; BACCA. (Org.). **O parque das memórias infinitas: 60 anos de histórias do Parque Nacional São Joaquim**. Urubici: Cinco Continentes, 2021.

BOMFIM, B.; SILVA, L. C. R.; PEREIRA, R. S.; GATTO, A.; EMMERT, F.; HIGUCHI, N. Litter and soil biogeochemical parameters as indicators of sustainable logging in Central Amazonia. **Science of the Total Environment**, v. 714, n. 1, p. 136780, 2020.

BORDERS, B. E.; BAILEY, R. L. Loblolly pine: Pushing the limits of growth. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 25, n. 2, p. 69-74, 2001.

BRITO, G. S.; BAUTISTA, S.; LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R. Soil labile organic carbon pools and dynamics of Brazilian woodland savanna (cerradão) under different land uses. **Biogeochemistry**, v. 144, n. 1, p. 31-46, 2019.

BROCK, O.; KOOIJMAN, A.; NIEROP, K. G. J.; MUYS, B.; VANCAMPENHOUT, K.; JANSEN, B. Disentangling the effects of parent material and litter input chemistry on molecular soil organic matter composition in converted forests in Western Europe. **Organic Geochemistry**, v. 134, n. 1, p. 66-76, 2019.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

BROUGHTON, W. J.; HANIN, M.; RELIÉ, B.; KOPCIŃSKA, J.; GOLINOWSKI, W.; SIMSEK, S.; OJANEN-REUHS, T.; REUHS, B.; MARIE, C.; KOBAYASHI, H.; BORDOGNA, B.; LE QUÉRE, A.; JABBOURI, S.; FELLAY, R.; PERRET, X.; DEAKIN, W. J. Flavonoid-Inducible modifications to Rhamnan O Antigens are necessary for *Rhizobium* sp. Strain NGR234-Legume symbiosis. **Journal of Bacteriology**, v. 188, p. 3654-3663, 2006.

BROUILLARD, B. M.; MIKKELSON, K. M.; BOKMAN, C. M.; BERRYMAN, E. M.; SHARP, J. O. Extent of localized tree mortality influences soil biogeochemical response in a beetle-infested coniferous forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 114, n. 1, p. 309-318, 2017.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKELE, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. 1, p. 105-125, 2018.

CAMARGO, F. A. O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 575-579, 1997.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221p.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em pastagem cultivada e nativa no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 631-637, 2009.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 147-157, 2009.

CHEN, B.; LIU, S.; GE, J.; CHU, J. Annual and seasonal variations of Q10 soil respiration in the sub-alpine forests of the eastern Qinghai-Tibet plateau, China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1735-1742, 2010.

CHEN, C.; CHEN, X.; CHEN, H. Y. H. Mapping N deposition impacts on soil microbial biomass across global terrestrial ecosystems. **Geoderma**, v. 433, p. 116429, 2023.

CHEN, C.; XIAO, W. The global positive effect of phosphorus addition on soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 176, p. 108882, 2023.

CHEN, J.; XIAO, W.; ZHENG, C.; ZHU, B. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107708, 2020.

CHENG, Y.; WANG, J.; WANG, J.; WANG, S.; CHANG, S. X.; CAI, Z.; ZHANG, J.; NIU, S.; HU, S. Nitrogen deposition differentially affects soil gross nitrogen transformations in organic and mineral horizons. **Earth-Science Reviews**, v. 201, n. 1, p. 103033, 2020.

CONRADS, H.; INGWERSEN, J.; JU, X.; STRECK, T. Direct Measurement of CO₂ Retention in Arable Soils with pH Above 6.5 During Barometric Process Separation Incubation. **Pedosphere**, v. 28, n. 5, p. 726-738, 2018.

CONSALTER, R.; BARBOSA, J. Z.; PRIOR, S. A.; VEZZANI, F. M.; BASSACO, M. V. M.; PEDREIRA, G. Q.; MOTTA, A. C. V. Mid-rotation fertilization and liming effects on nutrient dynamics of *Pinus taeda* L. in subtropical Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 19-35, 2020.

CONSALTER, R.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; VEZZANI, F. M.; RUBILAR, R. A.; PRIOR, S. A.; NISGOSKI, S.; BASSACO, M. V. M. Fertilization of *Pinus taeda* L. on an acidic oxisol in southern Brazil: growth, litter accumulation, and root exploration. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 1095-1112, 2021.

COSTA, J. J. F. **Estimativa de propriedades do solo por espectroscopia Vis-Nir-Swir e variáveis ambientais no sul do Brasil**. 125 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

COSTA, J. J. F.; GIASSON, E.; SILVA, E. B.; COBLINSKI, J. A.; TIECHER, T. Use of color parameters in the grouping of soil samples produces more accurate predictions of soil texture and soil organic carbon. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, p. 105710, 2020.

CROWTHER, T. W.; VAN DEN HOOGEN, J.; WAN, J.; MAYES, M. A.; KEISER, A. D.; MO, L.; AVERILL, C.; MAYNARD, D. S. The global soil community and its influence on biogeochemistry. **Science**, v. 365, n. 6455, eaav0550, 2019.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. D. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 506-513, 2015.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; ALMEIDA, J. A.; CURCIO, G. R. Solos do Planalto das Araucárias. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-

TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Pedologia - Solos Dos Biomas Brasileiros**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, 2017. p. 597.

DEKA, B.; DUTTA, M. Principal component analysis of soil properties in assessing erodibility indices in the Northern Brahmaputra plains of Assam. **Principal component analysis of soil properties in assessing erodibility indices in the 277 Northern Brahmaputra plains of Assam**, v. 15, n. 4, p. 277-283, 2016.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. Carbono, nitrogênio e fósforo na biomassa microbiana do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica - Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. p. 500-502.

DICKOW, K. M. C.; MARQUES, R.; PINTO, C. B.; HÖFER, H. Produção de serapilheira em diferentes fases sucessionais de uma floresta subtropical secundária, em Antonina, PR. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 75-86, 2012.

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.

DINIZ, T.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ALENCAR, C. M.; JUNQUEIRA, N. T. V. Alterações microbianas e químicas de um gleissolo sob macaubeiras nativas em função da variação sazonal e espacial. **Bioscience Journal**, v. 30, p.750-762, 2014.

DOBNER JR, M.; CAMPOE, O. C. Meteorological effects on 30-years-grown *Pinus taeda* under a gradient of crown thinning intensities in southern Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 453, p. 117624, 2019.

DRIDI, I.; GUEDDARI, M. Field and laboratory study of nitrogen mineralization dynamics in four Tunisian soils. **Journal of African Earth Sciences**, v. 154, n. 1, p. 101-110, 2019.

ESPÍNDOLA, S. P.; BOBUL'SKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Impact of nitrogen additions on soil microbial respiration and temperature sensitivity in native and agricultural ecosystems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Biology**, v. 75, n. 1, p. 120-127, 2018.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro-ondas para avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 991-996, 1999.

FINE, A. K.; SCHMIDT, M. P.; MARTÍNEZ, C. E. Nitrogen-rich compounds constitute an increasing proportion of organic matter with depth in Oi-Oe-Oa-A horizons of temperate forests. **Geoderma**, v. 323, n. 1, p. 1-12, 2018.

FOX, T. R.; ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J.; RUBILAR, R. A.; CARLSON, C. A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 31, p. 5-11, 2007.

FU, Q.; YAN, J.; LI, H.; LI, T.; HOU, R.; LIU, D.; JI, Y. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles. **Geoderma**, v. 353, n. 1, p. 459-467, 2019.

GATIBONI, L. C., DA SILVA, W. C., MUMBACH, G. L.; SCHMITT, D. E.; IOCHIMS, D. A.; STAHL, J.; VARGAS, C. O. Use of exchangeable and non exchangeable forms of calcium, magnesium, and potassium in soils without fertilization after successive cultivations with *Pinus taeda* in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 665-674, 2020.

GATIBONI, L. C.; VARGAS, C. O.; ALBUQUERQUE, J. A.; ALMEIDA, J. A.; STAHL, J.; CHAVES, D. M.; BRUNETTO, G.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; RAUBER, L.P. Phosphorus fractions in soil after successive crops of *Pinus taeda* L. without fertilization. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, p. 1-8, 2017.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; SANTOS, G. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em

plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, n. 1, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; VIANA, A. P. SANTOS, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1489-1499, 2008.

GAUDIO, N.; BELYAZID, S.; GENDRE, X.; MANSAT, A.; NICOLAS, M.; RIZZETTO, S.; SVERDRUO, H.; PROBST, A. Combined effect of atmospheric nitrogen deposition and climate change on temperate forest soil biogeochemistry: A modelling approach. **Ecological Modelling**, v. 306, n. 1. p. 24-34, 2015.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America, Part 4. p. 255-93, 2002.

GONÇALVES, A. S.; MONTEIRO, M. T.; GUERRA, J. G. M.; DE-POLLI, H. Biomassa microbiana em amostras de solos secadas ao ar e reumedecidas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 5, p. 651-658, 2002.

GONÇALVES, J. L. M.; RAIJ, B.; GONÇALVES, J. C. Florestais. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Boletim Técnico nº 100**. Campinas, IAC/FUNDAG. 2ª ed. rev. Atual. 1997. cap. 23, p. 245-258.

GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba IPEF, 2000. 427p.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 601-616, 2001.

GONÇALVES, J. L. M.; WICHERT, M. C. P.; GAVA, J. L.; MASETTO, A. V.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; SERRANO, M. I. P.; MELLO, S. L. M. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. **Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 69, p. 95-102, 2007.

GÖRANSSON, H.; GODBOLD, D. L.; JONES, D. L.; ROUSK, J. Bacterial growth and respiration responses upon rewetting dry forest soils: impact of drought-legacy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, n. 1, p. 477-486, 2013.

GOULARTE, G. D. **Vulnerabilidade de perda de fósforo em sistemas conservacionistas de produção agrícola**. 171 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

GRECCHI, R. C.; BEUCHLE, R.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E.; ACHARD, F. Assessing land cover changes in the Brazilian Cerrado between 1990 and 2010 using a remote sensing sampling approach. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, p. 2860-2866, 2015.

GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; PAVÃO, E. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, n. 15, p. 4765-4780, 2015.

GUHR, A.; MARZINI, C.; BORKEN, W.; POLL, C.; MATZNER, E. Effect of water redistribution by two distinct saprotrophic fungi on carbon mineralization and nitrogen translocation in dry soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, n. 1, p. 380-387, 2016.

HAGEMANN, N.; KAMMANN, C. I.; SCHMIDT, H. P.; KAPPLER, A.; BEHRENS, S. Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. **Plos One**, v. 11, n. 1, p. 171214, 2017.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2001.

HARRISON-KIRK, T.; BEARE, M. H.; MEENKEN, E. D.; CONDRON, L. M. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, n. 1, p. 50-60, 2014.

HASHIMOTO, M. O. **Avaliação de diferentes técnicas de extração de nutrientes do solo e de plantas de *Pinus taeda* L.** 64 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HEDO, J.; LUCAS-BORJA, M. E.; BAENA, C. W.; ANDRÉS-ABELLÁN, M.; HERAS, J. L. Experimental site and season over-control the effect of *Pinus halepensis* in microbiological properties of soils under semiarid and dry conditions. **Journal of Arid Environment**, v. 116, p. 44-52, 2015.

HEINZMANN, F. X.; MIYAZAVA, M.; PAVAN, M. A. Determinação de nitrato por espectrofotometria de absorção ultravioleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, n. 1, p. 159-163, 1984.

HOULE, D.; MOORE, J. D. Soil solution, foliar concentrations and tree growth response to 8 years of ammonium-nitrate additions in two boreal forests of Quebec, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 437, n. 1, p. 263-271, 2019.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experimente with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, p. 288-296, 2009.

IAPAR. Instituto Agronômico do Paraná. **Monitoramento meteorológico do estado do Paraná. Medias históricas em estações do IAPAR.** Londrina, 2020 em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas>. Acesso em: 25 jun. 2021.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2019.** Brasília, 2020 em: <<https://IBÁ.org/datafiles/publicacoes/relatorios/IBÁ-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2021.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBRAHIM, M.; KHAN, A.; ANJUM; ALI, W.; AKBAR, H. Mulching techniques: An approach for offsetting soil moisture deficit and enhancing manure mineralization during maize cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. 1, p. 104631, 2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações meteorológicas**. Brasília, 2020 em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAuto>> Acesso em: 28 mai. 2021.

JANSSON, J. K.; HOFMOCKEL, K. S. Soil microbiomes and climate change. **Nature Reviews Microbiology**, v. 18, p. 35-46, 2020.

JEDIDI, N.; VAN CLEEMPUT, O.; M'HIRI, A. Quantification des processus de minéralisation et d'organisation de l'azote dans un sol en présence d'amendements organiques. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, p. 85-91, 1995.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. Method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 1, p. 209-213, 1976.

JOERGENSEN, R. G.; EMMERLING, C. Methods for evaluating human impact on soil microorganisms based on their activity, biomass, and diversity in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 295-309, 2006.

JOSEPH, C. A.; KHIARI, L.; GALLICHAND, J.; BOUSLAMA, S. Classification and assessment models of first year byproducts nitrogen plant-availability from literature data. **Science of the Total Environment**, v. 586, n. 1, p. 976-984, 2017.

JOSHI, R. K.; GARKOTI, S. C. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya. **Catena**, v. 222, p. 106835, 2023.

KAMEI, J.; PANDEY, H. N.; BARIK, S. K. Tree species distribution and its impact on soil properties, and nitrogen and phosphorus mineralization in a humid subtropical forest ecosystem of northeastern India. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, n. 1, p. 36-37, 2008.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1-13, 2010.

KELLER, A. B.; REED, S. C.; TOWNSEND, A. R.; CLEVELAND, C. C. Effects of canopy tree species on belowground biogeochemistry in a lowland wet tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 61-69, 2013.

KEYS, K.; BURTON, D. L.; PRICE, G. W.; DUINKER, P. N. Forest floor chemistry and mineral soil ion exposure after surface application of alkaline-treated biosolids under two white spruce (*Picea glauca*) plantations in Nova Scotia, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. 1, p. 208-221, 2018.

KHIARI, Z.; KALUTHOTA, S.; SAVIDOV, N. Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. **Aquaculture**, v. 500, n. 1, p. 492-499, 2019.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W; Gieger, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebruder Borntrager, 1936. p. 1-44.

KULMANN, M. S. S.; DICK, G.; SCHUMACHER, M. V. Litterfall and Accumulated Nutrients in *Pinus taeda* Plantation and Native Forest in Southern Brazil. **Forests**, v. 12, p. 1791, 2021.

KUZYAKOV, Y.; HORWATH, W. R.; DORODNIKOV, M.; BLAGODATSKAYA, E. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 128, n. 1, p. 66-78, 2019.

LEE, K. H.; JOSE, S. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient. **Forest Ecology Management**, v. 185, n. 3, p. 263-273, 2003.

LEHMANN, J.; CRAVO, M. S.; MACÊDO, J. L. V.; MOREIRA, A.; SCHROTH, G. Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. **Plant Soil**, v. 237, p. 309-319, 2001.

LI, D.; LIU, J.; CHEN, H.; ZHENG, L.; WANG, K. Soil gross nitrogen transformations in responses to land use conversion in a subtropical karst region. **Journal of Environmental Management**, v. 212, n. 1, p. 1-7, 2018.

LI, H.; HAN, Y.; CAI, Z. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: dynamics and model fitting. **Geoderma**, v. 115, p. 161-175, 2003.

LI, J.; NIE, M.; PENDALL, E. Soil physico-chemical properties are more important than microbial diversity and enzyme activity in controlling carbon and nitrogen stocks near Sydney, Australia. **Geoderma**, v. 366, n. 1, p. 114201, 2020.

LIEBSCH, D.; GOLDENBERG, R.; MARQUES, M. C. M. Florística e estrutura de comunidades vegetais em uma cronoseqüência de Floresta Atlântica no Estado do Paraná, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 21, n. 4, p. 983-992, 2007.

LIMA, A. C. R.; BRUSSAARD, L.; TOTOLA, M. R.; HOOGMOED, W. B.; GOEDE, R. G. M. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, n. 1, p. 194-200, 2013.

LIMA, E. M. **Varição florístico-estrutural em duas pedosseqüências, em áreas de Cerrado, município de Formosa – Goiás**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

LIU, Y.; ZHANG, J.; YANG, W.; WU, F.; XU, Z.; TAN, B.; ZHANG, L.; HE, X.; GUO, L. Canopy gaps accelerate soil organic carbon retention by soil microbial biomass in

the organic horizon in a subalpine fir forest. **Applied Soil Ecology**, v. 125, n. 1, p. 169-176, 2018.

LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R.; BRITO, G. S.; BAUTISTA, S. Impact of the conversion of Brazilian woodland savanna (cerradão) to pasture and *Eucalyptus* plantations on soil nitrogen mineralization. **Science of the Total Environment**, v. 704, n. 1, p. 135397, 2020.

LU, T.; WANG, Y.; ZHU, H.; WEI, X.; SHAO, M. Drying-wetting cycles consistently increase net nitrogen mineralization in 25 agricultural soils across intensity and number of drying-wetting cycles. **Science of the Total Environment**, v. 710, n. 1, p. 135574, 2020.

LUO, Z.; FENG, W.; LUO, Y.; BALDOCK, J.; WANG, E. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, v. 23, n. 10, p. 4430-4439, 2017.

MA, F.; JIA, X.; ZHOU, W.; ZHOU, L.; YU, D.; MENG, Y.; DAI, L. Soil nitrogen mineralization in a wind-disturbed area on Changbai Mountain after 30 years of vegetation restoration. **Acta Ecologica Sinica**, v. 37, n. 1, p. 265-271, 2017.

MAGNUSSON, W. E.; LIMA, A. P.; LUIZÃO, R.; LUIZÃO, F.; COSTA, F. R.; CASTILHO, C. V. D.; KINUPP, V. F. RAPELD: a modification of the Gentry method for biodiversity surveys in long-term ecological research sites. **Biota Neotropica**, v. 5, n. 2, p. 19-24, 2005.

MAIA, N. J. C.; CRUZ, M. C. P.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; MENEGATTO, L. S.; AUGUSTO, J. G.; MENDONÇA, G. G.; TERÇARIOL, M. C.; OLIVEIRA, J. G.; SIMILI, F. F. Integrated crop-livestock versus conventional systems: use of soil indicators to detect short-term changes during seasonal variation. **Bragantia**, v. 80, p. e5821, 2021.

MANIRAKIZA, E.; ZIADI, N.; LUCE, M. S.; HAMEL, C.; ANTOUN, H.; KARAM, A. Nitrogen mineralization and microbial biomass carbon and nitrogen in response to

co-application of biochar and paper mill biosolids. **Applied Soil Ecology**, v. 142, n. 1, p. 90-98, 2019.

MARQUES, R.; LARSEN, J. G.; CATTARIN, A.; SILVEIRA, F. M. Biomass and nutrients in the forest-floor litter of second-growth brazilian atlantic forests. **Floresta**, v. 53, n. 1, p. 80-88, 2023.

MARQUES, R.; MOTTA, A. C. V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, M. R. (Org.) **Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas**. Curitiba, UFPR, 2003. p.81-102.

MARQUES, R.; PIAZZA, G. E.; BLUM, H.; PINTO, C. B.; BIANCHIN, J. E.; DALMASO, C. A.; DICKOW, K. M. C. Contribuição da precipitação interna para o aporte de nutrientes em estágios sucessionais da floresta atlântica no paraná. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 4, p. 80-95, 2015.

MCKENZIE, J.; GOLDMAN, R. N. **The student edition of minitab for windows manual**. v.12, Softcover ed. Belmont: Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1999. 592p.

MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R.; LIMA, J. R. S.; ALMEIDA-CÔRTEZ, J. S.; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; CURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, v. 151, n. 1, p. 137-146, 2017.

MGELWA, A. S.; HU, Y. L.; XU, W. B.; GE, Z. Q.; YU, T. W. Soil carbon and nitrogen availability are key determinants of soil microbial biomass and respiration in forests along urbanized rivers of southern China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 43, n. 1, p. 126351, 2019.

MILLER, A. E.; SCHIMEL, J. P.; MEIXNER, T.; SICKMAN, J. O.; MELAK, J. M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 2195-2204, 2005.

MONZ, C. A.; REUSS, D. E.; ELLIOTT, E. T. Soil microbial biomass carbon and nitrogen estimates using 2450 MHz microwave irradiation or chloroform fumigation followed by direct extraction. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 34, p. 55-63, 1991.

MORO, L.; GATIBONI, L. C.; SIMONETE, M. A.; CASSOL, P. C.; CHAVES, D. M. Response of one-, five-, and nine-year-old *Pinus taeda* to N PK fertilization in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1181-1189, 2014.

MOSCATELLI, M. C.; DE ANGELIS, P.; LAGOMARSINO, A.; GREGO, S. Short- and medium-term contrasting effects of nitrogen fertilization on C and N cycling in a poplar plantation soil. **Forest Ecology Management**, v. 255, p.447-454, 2008.

MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; CONSALTER, R.; REISSMANN, C. B. Nutrição e adubação da cultura de *Pinus*. In: **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. 1ª ed. Jaboticabal: FUNEP, 2014, v. 15, p. 383-426.

MÜLLER, F. **Floresta atlântica do sul do Brasil e diversidade microbiológica do solo sob essências florestais leguminosas**. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, M. T.; LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 12-26, 2017.

NAYLOR, D.; MCCLURE, R.; JANSSON, J. Trends in Microbial Community Composition and Function by Soil Depth. **Advances in Soil Microbiome**, v. 10, n. 3, p. 540, 2022.

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; HUGHES, H. J.; JUNGKUNST, H. F.; GEROLD, G. Impacts of land-use and land-cover change on stream hydrochemistry in the Cerrado and Amazon biomes. **Science of the Total Environment**, v. 635, n. 1, p. 259-274, 2018.

NOOJIPADY, P.; MORTON, D.; MACEDO, M.; VICTÓRIA, D.; HUANG, C.; GIBBS, H.; BOLFE, E. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 025004, 2017.

NORMAN, R. J.; STUCKI, J. W. The determination of nitrate and nitrite in soil extracts by ultraviolet spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 347-353, 1981.

NOVAIR, S. B.; HOSSEINI, H. M.; ETESAMI, H.; RAZAVIPOUR, T. Rice straw and composted azolla alter carbon and nitrogen mineralization and microbial activity of a paddy soil under drying–rewetting cycles. **Applied Soil Ecology**, v. 154, n. 1, p. 103638, 2020.

NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; BRUMATTI, A. V.; SANTOS, L. L.; SALES, L. C. Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal**, v. 41, n. 3, p. 603-611, 2018.

ODUM, E. P. Trends expected in stressed ecosystems. **BioScience**, v. 35, p. 419-422, 1985.

OLIVEIRA, R. A. C.; MARQUES, R.; MARQUES, M. Plant diversity and local environmental conditions indirectly affect litter decomposition in a tropical forest. **Applied Soil Ecology**, v. 134, n. 1, p. 45-53, 2019.

PEÑA, M. L. P.; MARQUES, R.; JAHNEL, M. C.; ANJOS, A. A. Respiração microbiana como indicador da qualidade do solo em ecossistema florestal. **Floresta**, v. 35, p. 117-126, 2005.

PIETIKÄINEN, J.; TIKKA, P.J.; VALKONEN, S.; ISOMÄKI, A.; FRITZE, H. Is the soil microbial community related to the basal area of trees in a Scots pine stand? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1832-1834, 2007.

PINTO, C. B. **Relação entre atributos edáficos, crescimento e nutrição de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil, sob influência da fertilização.** 139 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

PINTO, C. B.; MARQUES, R.; DALMASO, C. A.; KULMANN, M. S. S.; DELIBERALI, I.; SCHUMACHER, M. V.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C. Relationship between edaphoclimatic attributes and productivity of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in southern Brazil. **Forest Ecology Management**, v. 544, p. 121162, 2023.

PINTO JR, J. E.; SANTOS, P. E. T.; AGUIAR, A. V.; KALIL FILHO, A. N.; PALUDZYSZYN FILHO, E.; STURION, J. A.; RESENDE, M. D. V.; SOUSA, V. A. **Melhoramento genético de espécies arbóreas na Embrapa Florestas: uma visão histórica.** Colombo: Embrapa Florestas, Colombo, 2013.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; VOGELMANN, E. S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M. Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 129-38, 2013.

POLGLASE, P. J.; COMERFORD, M. B.; JOKELA, E. J. Leaching of inorganic from of southern pine plantations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 566-572, 1992.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. H.; LISBOA, H. M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecossistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floram**, v. 24, p. e00110314, 2017.

RASCIO, N.; LA ROCCA, N. Biological nitrogen fixation. – In: ELIAS S. A. (ed.): Reference **Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Elsevier, Amsterdam, 2013. p. 412-419.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2019.

RITZ, K.; BLACK, H. I. J.; CAMPBELL, C. D.; HARRIS, J. A.; WOOD, C. Selecting biological indicators for monitoring soils: A framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. **Ecological Indicators**, v. 9, p. 1212-1221, 2009.

RODERJAN, C. V.; KUNIYOSHI, Y. S.; GALVÃO, F.; HATSCHBACH, G. G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná. **Ciência & Ambiente**, v. 24, p. 75-92, 2002.

RODRIGUEZ, D. R. O.; ANDRADE, G. C.; JURADO BELLOTE, A. F. J.; TOM AZELLOFILHO, M. Effect of pulp and paper mill sludge on the development of 17-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 422, p.179-189, 2018.

ROMEO, F.; SETTINERI, G.; SIDARI, M.; MALLAMACI, C.; MUSCOLO, A. Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. **Forest Ecology and Management**, v. 465, n. 1, p. 118106, 2020.

SAGLIKER, H. A.; CENKSEVEN, S.; KIZILDAG, N.; KOCAK, B.; OZDENIZ, E.; OZBEY, B. G.; BÖLÜKBASI, A.; KURT, L. Is parent material an important factor in soil carbon and nitrogen mineralization? **European Journal of Soil Biology**, v. 89, n. 1, p. 45-50, 2018.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 239-248, 2015.

SAMUELSON, L.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management. **Forest Ecology and Management**, v. 192, p. 59-70, 2004.

SAMUELSON, L.; MATHEW, R.; STOKES, T.; FENG, Y.; AUBREY, D.; COLEMAN, M. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven

years of irrigation and fertilization. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2431-2438, 2009.

SANTOS, E. D. **Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo, sob diferentes tipologias vegetais, na área de ocorrência da Floresta Ombrófila Densa, Antonina-PR**. 104 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SANTOS, E.; MARTINS, K. G.; MARQUES, R. Mineralização do nitrogênio no solo sob Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas, em Paranaguá, PR-Brasil. **Nativa**, v. 8, n. 4, p. 558-566, 2020.

SANTOS, K. F.; REICHERT, J. M. Best tillage practices for eucalyptus growth and productivity: A review on the Brazilian experience. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0210091, 2022.

SAWADA, K.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T. Effect of repeated drying–rewetting cycles on microbial biomass carbon in soils with different climatic histories. **Applied Soil Ecology**, v. 120, n. 1, p. 1-7, 2017.

SCHIMEL, J. P.; WEINTRAUB, M. N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, p. 549-563, 2003.

SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; WITSCHORECK, R. Litter production and nutrients transfer in a second rotation area with *Pinus taeda* L. forest in Cambará do Sul, RS. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 4, p. 471-480, 2008.

SHARPLEY, A. N.; WANG, X. Managing agricultural phosphorus for water quality: Lessons from the USA and China. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 26, n. 9, p. 1770-1782, 2014.

SHEN, Y.; RYSER, E.; LI, H.; ZHANG, W. Bacterial community assembly and antibiotic resistance genes in the lettuce-soil system upon antibiotic exposure. **Science of The Total Environment**, v. 778, p. 146255, 2021.

SILVA, A. O.; COSTA, A. M.; TEIXEIRA, A. F. S.; GUIMARÃES, A. A.; SANTOS, J. V.; MOREIRA, F. M. S. Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysognomies. **Ecological Indicators**, v. 93, n. 1, p. 142-151, 2018.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2)**. Comunicado técnico. EMBRAPA. v. 99, Seropédica, 2007.

SILVA, R. S.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010.

SINGH, A. K.; KUSHWAHA, M.; RAI, A.; SINGH, N. Changes in soil microbial response across year following a wildfire in tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 391, p. 458-468, 2017.

SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. Lavras: UFLA, 2010. 716p.

SIXEL, R. M. M.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ANDRADE, G. R. P.; AZEVEDO, A. C.; STAHL, J.; MOREIRA, A. M. Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on nutrient export and stocks in the biomass and in the soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1416-1427, 2015.

SOARES, D. S.; RAMOS, M. L. G.; MARCHÃO, R. L.; MACIEL, G. A.; OLIVEIRA, A. D.; MALAQUIAS, J. V.; CARVALHO, A. M. How diversity of crop residues in long-term no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 1, p. 104316, 2019.

SOUZA, A. G. V.; SILVA, G. G.; BESERRA, G. A.; SOUZA, L. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, V. D.; ROCHA FILHO, C. T.; SERAFIM, M. N.; SANTOS, L. C. S.; SANTOS, T. E. B.; VALE, V. S. Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3673, 2021.

SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, p. 3405-3413, 2016.

SUN, Y.; HE, Z.; WU, Q.; ZHENG, J.; LI, Y.; WANG, Y.; CHEN, T.; CHI, D. Zeolite amendment enhances rice production, nitrogen accumulation and translocation in wetting and drying irrigation paddy field. **Agricultural Water Management**, v. 235, n. 1, p. 106126, 2020.

TANG, J.; ZHANG, J.; REN, L.; ZHOU, Y.; GAO, J.; LUO, L.; YANG, Y.; PENG, Q.; HUANG, H.; CHEN, A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 242, n. 1, p. 121-130, 2019.

TATE, K. R.; ROSS, D. J.; SAGGAR, S.; HEDLEY, C. B.; DANDO, J.; SINGH, B. K.; LAMBIE, S. M. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1437-1449, 2007.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, E. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2015.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biossólido industrial e cultivo de milho. **Revista Brasileira de Solo**, v. 31, n. 1, p. 1173-1184, 2007.

TREML, L. M. **Vegetação e solo: estudo de caso em uma área de transição entre fisionomias no bioma Cerrado**. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

TREML, L. M.; CATTARIN, A.; MARQUES, R.; GALVÃO, F.; CRIVELLARI, L. B.; COUTINHO, V. M. Floristic similarity in a forest-savannah ecotone in western Bahia state, Brazil. **Floresta**, v. 52, n. 4, p. 475-483, 2022.

TRYEE, M. C.; SEILER, J. R.; AUST, W. M.; SAMPSON, D. A.; FOX, T. R. Long-term effects of site preparation and fertilization on total soil CO₂ efflux and heterotrophic respiration in a 33-year-old *Pinus taeda* L. plantation on the wet flats of the Virginia Lower Coastal Plain. **Forest Ecology and Management**, v. 234, p. 363-369, 2006.

TSCHIEDER, E. F.; FERNÁNDEZ, M. E.; SCHLICHTER, T. M.; PINAZO, M. A.; CRECHI, E. H. Influence of growth dominance and individual tree growth efficiency on *Pinus taeda* stand growth. A contribution to the debate about why stands productivity declines. **Forest Ecology and Management**, v. 277, p. 116-123, 2012.

TULIO, R. H.; RACHWAL, M. F. G.; ZANATTA, J. A.; SILVA, K.; KASCHUK, G. Physical, chemical and microbiological soil attributes influence soil greenhouse gases fluxes in Atlantic Forest and pine (*Pinus taeda*) plantations in Brazil. **Soil Use and Management**, v. 39, p. 183-197, 2022.

UZOHO, B. U.; IGBOJIONU, G. U. Carbohydrate distribution of particle size fractions of soils in relation to land-use types in Mbaise, Southeastern Nigeria. **Journal of Biology, Agriculture and Healthcare**, v. 4, p. 27-36, 2014.

VALERA, C. A.; VALLE JUNIOR, R. F.; VARANDAS, S. G. P.; SANCHES FERNANDES, L. F.; PACHECO, F. A. L. The role of environmental land use conflicts in soil fertility: a study on the Uberaba River basin, Brazil. **Science Total Environmental**, v. 562, p. 463-473, 2016.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, n. 1, p. 703-707, 1987.

VASQUES, A. G.; NOGUEIRA, A. S.; KIRCHNER, F. F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero *Pinus* para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **Floresta**, v. 37, n. 3, p. 1-6, 2007.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, n. 1, p. 139-146, 2019.

VIANNA, L. F. N.; SILVA, E. B.; MASSIGNAM, A. M.; OLIVEIRA, S. N. Aplicação de descritores de heterogeneidade Ambiental na seleção de áreas para sistemas de parcelas amostrais: um estudo de caso para a determinação de rotspots potenciais de biodiversidade. **Geografia**, Rio Claro, v. 40, n. 2, p. 211-239, 2015.

VIVANCO, L.; AUSTIN, A. T. The importance of macro- and micro-nutrients over climate for leaf litter decomposition and nutrient release in Patagonian temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 441, n. 1, p. 144-154, 2019.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; NEVEZ, J. L. Avaliação nutricional e índices DRIS em um povoamento de *Pinus taeda* L. submetido à adubação NPK. **Enflo**, v. 6, n. 3, p. 59-70, 2018.

VOSE, J. M.; ALLEN, H. L. Leaf area, stemwood growth and nutrition relationships in loblolly pine. **Forest Science**, v. 34, p. 547-563, 1988.

WANG, C.; WAN, S.; XING, X.; ZHANG, L.; HAN, X. Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 1101-1110, 2006.

WARD, E. J.; DOMEK, J. C.; LAVINER, M. A.; FOX, T. R.; SUN, G.; MCNULTY, S.; KING, J.; NOORMETS, A. Fertilization intensifies drought stress: Water use and

stomatal conductance of *Pinus taeda* in a midrotation fertilization and throughfall reduction experiment. **Forest Ecology and Management**, v. 355, p. 72-82, 2015.

WARING, S. A.; BREMNER, J. M. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. **Nature**, v. 201, n. 1, p. 951-952, 1964.

WOICIECHOWSKI, T.; MARQUES, R. Produção de serapilheira e restituição de nutrientes em florestas secundárias do litoral paranaense. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 5, n. 2, p. 1-15, 2017.

WOLOSZCZYK, P.; FIENCKE, C.; ELSNER, D. C.; CORDSEN, E.; PFEIFFER, E. M. Spatial and temporal patterns in soil organic carbon, microbial biomass and activity under different land-use types in a long-term soil-monitoring network. *Pedobiologia*. **Journal of Soil Ecology**, v. 80, n. 1, p. 150642, 2020.

WU, K.; CHEN, D.; TU, C.; QIU, Y.; BURKEY, K. O.; REBERG-HORTON, S. C.; PENG, S.; HU, S. CO₂-induced alterations in plant nitrate utilization and root exudation stimulate N₂O emissions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 106, n. 1, p. 9-17, 2017.

WU, W.; ZHANG, C.; LIANG, X.; ZHU, C.; WANG, T.; ZHANG, J. Elevated CO₂ improved soil nitrogen mineralization capacity of rice paddy. **Science Total Environmental**, v. 710, p. 136438, 2020.

YAGI, R.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C. Mineralização potencial e líquida de nitrogênio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 385-394, 2009.

YAO, X.; ZHENG, W.; ZENG, H.; WANG, W. Soil Microbial Attributes along a Chronosequence of Scots Pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) Plantations in Northern China. **Pedosphere**, v. 30, n. 4, p. 60329, 2017.

YEMADJE, P. L.; CHEVALLIER, T.; GUIBERT, H.; BERTRAND, I.; BERNOUX, M. Wetting-drying cycles do not increase organic carbon and nitrogen mineralization in soils with straw amendment. **Geoderma**, v. 304, n. 1, p. 68-75, 2017.

YUN, Y.; WANG, H.; MAN, B.; XIANG, X.; ZHOU, J.; QIU, X.; DUAN, Y.; ENGEL, A.S. The Relationship between PH and Bacterial Communities in a Single Karst Ecosystem and Its Implication for Soil Acidification. **Frontiers Microbiology**, v. 7, p. 1955, 2016.

ZHANG, M.; WANG, W.; WANG, D.; HEENAN, M.; XU, Z. Short-term responses of soil nitrogen mineralization, nitrification and denitrification to prescribed burning in a suburban forest ecosystem of subtropical Australia. **Science of the Total Environment**, v. 642, n. 1, p. 879-886, 2018.

ZHANG, Y.; MARSCHNER, P. Residue addition combined with rewetting of dry soil – Effect of timing of residue addition on soil respiration, microbial biomass, nutrient availability and legacy effect. **Geoderma**, v. 299, n. 1, p. 83-90, 2017.

ZHAO, N.; LI, X. G. Effects of aspect–vegetation complex on soil nitrogen mineralization and microbial activity on the Tibetan Plateau. **Catena**, v. 155, n. 1, p. 1-9, 2017.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGEMBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, p. 117-161, 1997.

ZILLI, J. E.; RUMJANEK, N. G.; XAVIER, G. R.; COUTINHO, H. L. C.; NEVES, M. C. P. Diversidade microbiana como indicador de qualidade do solo. **Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 3, p. 391-411, 2003.

ZUCON, A.; DOMINSCHEK, R.; MOTTA, A. C. V. Can fertilization and liming affect the amount of litter and roots on *Pinus taeda* forest floor? **Scientia Forestalis**, v. 48 n. 128, p. e3193, 2020.

APÊNDICE 1

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes na parcela P3, Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Casearia obliqua</i>	248	5,3	12,0
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	99	5,8	8,8
<i>Psychotria nuda</i>	190	1,1	7,0
<i>Pera glabrata</i>	62	2,8	5,1
<i>Euterpe edulis</i>	99	1,1	4,8
<i>Sloanea guianensis</i>	67	1,7	4,2
<i>Vochysia bifalcata</i>	17	3,2	3,8
<i>Astrocaryum aculeatissimum</i>	49	1,2	3,3
<i>Cupania oblongifolia</i>	24	0,8	2,3
<i>Marlierea tomentosa</i>	35	0,3	2,2
<i>Marlierea obscura</i>	28	0,4	2,0
<i>Alchornea triplinervia</i>	14	0,8	1,8
<i>Bathysa australis</i>	30	0,3	1,8
<i>Myrcia pubipetala</i>	21	0,6	1,6
<i>Chrysophyllum inornatum</i>	20	0,4	1,3
Indivíduos mortos	80	2,0	5,1
Outras espécies	345	10,0	32,8
Total	1428	37,9	100

Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

APÊNDICE 2

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes na parcela P5, Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Psychotria nuda</i>	152	0,9	6,7
<i>Euterpe edulis</i>	111	1,4	6,0
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	56	2,4	5,2
<i>Sloanea guianensis</i>	39	1,6	3,7
<i>Marlierea tomentosa</i>	42	0,4	2,7

<i>Ficus sp.</i>	7	1,7	2,2
<i>Virola bicuhyba</i>	16	1,0	2,0
<i>Pera glabrata</i>	19	0,7	2,0
<i>Mollinedia uleana</i>	24	0,1	1,7
<i>Rudgea jasminoides</i>	21	0,1	1,5
<i>Casearia obliqua</i>	17	0,3	1,4
<i>Pouteria durlandii</i>	16	0,3	1,4
<i>Coussarea contracta</i>	19	0,1	1,4
<i>Guapira opposita</i>	10	0,5	1,3
<i>Cryptocarya aschersoniana</i>	7	0,7	1,3
Indivíduos mortos	97	2,7	6,9
Outras espécies	510	17,6	52,5
Total	1163	32,6	100

Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

APÊNDICE 3

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes na parcela P7, Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Sloanea guianensis</i>	43	4,3	6,5
<i>Euterpe edulis</i>	126	1,5	6,3
<i>Psychotria nuda</i>	98	0,5	4,6
<i>Pausandra morisiana</i>	54	0,6	3,3
<i>Cyathea sp.</i>	72	0,3	3,2
<i>Virola bicuhyba</i>	25	1,5	2,9
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	30	1,3	2,9
<i>Guapira opposita</i>	31	0,8	2,4
<i>Brosimum lactescens</i>	15	1,1	2,0
<i>Cyathea corcovadensis</i>	30	0,1	1,8
<i>Cryptocarya mandioccana</i>	11	0,9	1,8
<i>Garcinia brasiliensis</i>	24	0,2	1,7
<i>Ocotea sp.</i>	19	0,5	1,6
<i>Pouteria durlandii</i>	16	0,5	1,6
<i>Aparisthium cordatum</i>	29	0,3	1,5
Indivíduos mortos	59	2,0	4,8
Outras espécies	534	16,7	51

Total	1216	33,1	100
-------	------	------	-----

Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

APÊNDICE 4

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes na parcela P9, Reserva Natural Guaricica, Antonina, Paraná.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Euterpe edulis</i>	99	1,0	4,9
<i>Psychotria nuda</i>	63	0,4	3,5
<i>Garcinia brasiliensis</i>	38	0,5	2,7
<i>Coussarea contracta</i>	45	0,5	2,7
<i>Sorocea bonplandii</i>	36	0,4	2,6
<i>Rudgea jasminoides</i>	32	0,2	2,0
<i>Sloanea guianensis</i>	17	0,9	1,9
<i>Inga sp.</i>	13	0,6	1,3
<i>Pausandra morisiana</i>	21	0,3	1,3
<i>Mollinedia sp.</i>	13	0,1	1,1
<i>Guapira opposita</i>	14	0,2	1,1
<i>A. aculeatissimum</i>	12	0,1	1,1
<i>Virola bicuhyba</i>	10	0,4	1,1
<i>Cyathea corcovadensis</i>	13	0,0	1,1
<i>Psychotria suterella</i>	12	0,1	1,1
Indivíduos mortos	43	2,0	4,1
Outras espécies	767	36,3	66,5
Total	1248	43,9	100

Fonte: Adaptado de Bianchin (2017).

APÊNDICE 5

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes no grupamento I do Cerrado (Savana Arborizada).

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Eugenia dysenterica</i> (Mart.) DC.	213,33	2,42	16,52

<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão	80,00	1,13	8,25
<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	86,67	0,91	7,49
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	3,33	1,42	4,36
<i>Machaerium opacum</i> Vogel	46,67	0,37	4,23
<i>Dalbergia</i> sp.1	46,67	0,51	4,23
<i>Magonia pubescens</i> A.St.-Hil.	16,67	0,89	4,17
<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	50,00	0,37	3,94
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	10,00	0,95	3,33
<i>Aspidosperma tomentosum</i> Mart. & Zucc.	23,33	0,25	3,06
<i>Annona leptopetala</i> (R.E.Fr.) H.Rainer	26,67	0,12	2,82
<i>Machaerium stipitatum</i> Vogel	26,67	0,26	2,44
<i>Mimosa arenosa</i> (Willd.) Poir.	20,00	0,12	2,20
<i>Eugenia</i> sp.1	23,33	0,20	2,16
<i>Cordia glabrata</i> (Mart.) A.DC.	26,67	0,29	2,14
<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart. ex Hayne	13,33	0,19	1,77
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	26,67	0,15	1,76
<i>Senna macranthera</i> (DC. ex Collad.) H.S.Irwin & Barneby	13,33	0,03	1,72
<i>Erythroxylum caatingae</i> Plowman	10,00	0,07	1,72
<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	13,33	0,16	1,68
<i>Dilodrendron bipinnatum</i> Radlk.	10,00	0,05	1,65
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemao) Ducke	13,33	0,05	1,38
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	6,67	0,06	1,18
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	6,67	0,02	1,06
<i>Cordia macrophylla</i> (K.Schum.) Kuntze	13,33	0,07	1,04
<i>Machaerium acutifolium</i> Vogel	3,33	0,04	0,62
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D.Don ex Steud.	3,33	0,04	0,62
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	3,33	0,04	0,61
<i>Terminalia argentea</i> Mart. & Zucc.	3,33	0,04	0,61
<i>Zanthoxylum carIBÁeum</i> Lam.	3,33	0,02	0,56

<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	3,33	0,02	0,56
Fabaceae 1	3,33	0,01	0,54
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B.Gillett	3,33	0,01	0,54
<i>Psidium myrsinites</i> DC.	3,33	0,01	0,53
<i>Callisthene fasciculata</i> Mart.	3,33	0,01	0,53
<i>Pterodon emarginatus</i> Vogel	3,33	0,01	0,53
Indivíduos mortos	70,00	0,98	7,49
Total	933,33	12,29	100

Fonte: Adaptado de Trembl (2021).

APÊNDICE 6

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes no grupamento II (Floresta Estacional Decidual), localizadas no município de São Desidério, Bahia.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Combretum leprosum</i> Mart.	315	3,61	17,75
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	160	1,43	9,33
<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão	90	2,45	8,67
<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	105	1,63	8,13
<i>Callisthene fasciculata</i> Mart.	75	1,93	7,84
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	55	1,35	6,20
<i>Eugenia dysenterica</i> (Mart.) DC.	65	0,42	4,23
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	35	0,34	3,24
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	30	0,22	2,88
<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	15	0,35	2,68
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	25	0,14	2,58
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	5	1,02	2,55
<i>Aspidosperma</i> aff. <i>cylindrocarpon</i> Müll.Arg.	25	0,46	2,10
<i>Pseudobombax tomentosum</i> (Mart.) A.Robyns	10	0,66	2,04

<i>Machaerium acutifolium</i> Vogel	5	0,41	1,42
<i>Annona leptopetala</i> (R.E.Fr.) H.Rainer	20	0,08	1,26
<i>Erythroxylum deciduum</i> A.St.-Hil.	10	0,21	1,20
<i>Magonia pubescens</i> A.St.-Hil.	5	0,27	1,17
<i>Luetzelburgia auriculata</i> (Allemao) Ducke	10	0,12	1,04
<i>Terminalia argentea</i> Mart. & Zucc.	10	0,06	0,94
<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	10	0,06	0,93
<i>Cordia macrophylla</i> (K.Schum.) Kuntze	10	0,05	0,91
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	5	0,08	0,83
<i>Machaerium stipitatum</i> Vogel	5	0,08	0,83
<i>Sterculia striata</i> A.St.-Hil. & Naudin	5	0,08	0,83
<i>Simarouba versicolor</i> A.St.-Hil.	5	0,07	0,82
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	5	0,06	0,79
<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	5	0,06	0,79
<i>Alseis</i> sp.1	5	0,05	0,78
<i>Ficus</i> sp.1	5	0,04	0,76
<i>Pouteria</i> sp.1	5	0,03	0,73
<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	5	0,01	0,70
Indivíduos mortos	30	0,33	3,07
Total	1170	20,2	100

Fonte: Adaptado de Tremli (2021).

APÊNDICE 7

Parâmetros fitossociológicos das espécies florestais presentes no grupamento III (transição savana/floresta), localizadas no município de São Desidério, Bahia.

Espécies	DA	DoA	VI
	Ind. ha ⁻¹	m ² ha ⁻¹	%
<i>Combretum leprosum</i> Mart.	130	1,67	13,87
<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	20	3,49	11,85

<i>Combretum glaucocarpum</i> Mart.	70	1,71	10,94
<i>Machaerium stipitatum</i> Vogel	150	0,72	10,92
<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	60	1,11	8,82
<i>Platypodium elegans</i> Vogel	50	0,66	7,09
<i>Dalbergia</i> sp.1	40	0,53	6,23
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	10	0,78	4,00
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	10	0,57	3,45
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	10	0,36	2,86
<i>Margaritaria nobilis</i> L.f.	10	0,13	2,25
<i>Myracrodruon urundeuva</i> Allemão	10	0,09	2,14
<i>Machaerium acutifolium</i> Vogel	10	0,08	2,11
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	10	0,05	2,04
<i>Pterocarpus rohrii</i> Vahl	10	0,04	1,99
<i>Alseis</i> sp.1	10	0,03	1,98
<i>Aspidosperma</i> sp.1	10	0,03	1,98
<i>Annona leptopetala</i> (R.E.Fr.) H.Rainer	10	0,02	1,96
Indivíduos mortos	30	0,22	3,51
Total	660	12,2	100

Fonte: Adaptado de Tremli (2021).