

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CAMILA ELIS CASARIL

FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PRODUTIVAS E EM RECUPERAÇÃO
AMBIENTAL PÓS-COLHEITA DE PINUS

LAGES

2022

CAMILA ELIS CASARIL

**FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PRODUTIVAS E EM RECUPERAÇÃO
AMBIENTAL PÓS-COLHEITA DE PINUS**

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Osmar Klauberg Filho

LAGES

2022

Universidade do Estado de Santa Catarina

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da Biblioteca

Setorial do CAV/UDESC, com os dados fornecidos pela autora

Casari, Camila Elis

FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PRODUTIVAS E EM
RECUPERAÇÃO AMBIENTAL PÓS-COLHEITA DE PINUS /
Camila Elis Casari. -- 2022.

116 p.

Orientador: Osmar Klauber Filho

Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo, Lages, 2022.

1. biologia do solo. 2. regeneração natural. 3. monitoramento. I.
Klauber Filho, Osmar. II. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CAMILA ELIS CASARIL

**FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PRODUTIVAS E EM RECUPERAÇÃO
AMBIENTAL PÓS-COLHEITA DE PINUS**

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Osmar Klauberg Filho

Membros:

Prof. Dr. Dilmar Baretta – UDESC Oeste

Prof. Dr. Luís Carlos Iuñes de Oliveira Filho – UDESC Lages

Dra. Mireli Moura Pitz Floriani – Klabin S.A.

Dra. Letícia Scopel Camargo Carniel – BASF S.A.

Lages, 12 de agosto de 2022.

Dedico essa tese a todos aqueles que reconhecem a importância da ciência e da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a toda minha ancestralidade pela vida. Agradeço a todos aqueles que permitiram que a vida chegasse e passasse através de mim, para que eu possa me colocar a serviço de algo maior. Obrigada, eu vejo vocês!

Agradeço meu noivo e companheiro Matheus, por todo apoio emocional e prático desde o dia que fiz a matrícula no doutorado. Pelas nossas construções diárias no sentido do amor, companheirismo e amadurecimento que, certamente refletem sobre o meu trabalho.

À minha mãe Marlene pôr a ser a minha base e a maior incentivadora dos meus estudos. Ao meu padrasto e segundo pai Wilmar que nunca mediu esforços para me ajudar desde que chegou a minha vida. No doutorado estive à frente comigo no início dos trabalhos de campo, desbravando as áreas de coleta.

À psicóloga Rubia Ochoa, profissional da mais alta categoria que me ajudou a equilibrar emocional e racional ao longo do tempo de doutorado.

Ao Prof. Dr. Osmar Klauberg Filho por todo empenho, paciência e dedicação na orientação e, por sempre ter confiado no meu trabalho. Ao Prof. Dr. Luís Carlos Iuñes Filho que tem me ajudado incansavelmente nas publicações e escrita, desde a época do mestrado. Ao professor Prof. Dr. Julio Cesar Pires Santos, por ser o primeiro a me acolher e orientar na pós-graduação, também pelo incentivo à minha volta a Lages.

Agradeço à Klabin pelo financiamento do projeto de doutorado. Também agradeço todo o apoio e parceria representados no trabalho da Dra. Mireli Pitz Floriani que, muito se empenhou para o bom andamento e desenvolvimento do projeto em todas as fases. Agradeço ao Seu João de Moraes por toda paciência, solicitude e por sempre nos levar e trazer do campo com segurança.

Aos bolsistas de campo e laboratório, Elder, Gustavo, Henrique, Lucas e Gabriel e ainda, as ‘minhas pupilas’, Eduarda, Giovana e Vitória. A todos os meus colegas do Laboratório de Ecologia do Solo, Lab. de Ecologia Terrestre e Programa de Pós-

Graduação em Ciência do Solo CAV/UDESC. As minhas colegas e companheiras de jornada dentro e fora do doutorado, Gilvani, Julia e Thuanne – “lá vamos nós”.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade do doutorado, aos professores e equipe técnica que fazem esse programa de excelência acontecer. À FAPESC e UDESC/PROMOP pelo apoio financeiro e disponibilização da bolsa ao longo do período de doutoramento. Ao Programa PAP FAPESC (PROJETO FAPESC 2019 TR617 pelos recursos financeiros de apoio as pesquisas do grupo Solos e Sustentabilidade - UDESC.

“A natureza não nos pertence, nós pertencemos à natureza”

Provérbio indígena

RESUMO GERAL

Em cada ciclo, as fazendas florestais sofrem ajustes nos talhões de plantios e adequações em áreas destinadas a vegetação nativa. As novas áreas destinadas a conservação, apresentam com alterações na estrutura da comunidade da fauna do solo, devido ao cultivo do pinus por longos períodos. No entanto, estas alterações podem ser recuperadas ao longo do tempo, de forma natural. O objetivo deste estudo foi avaliar a recomposição da estrutura da comunidade da fauna do solo em áreas de Cambissolo e Nitossolo com retirada recente do pinus (Capítulo 1), investigar como acontece o processo de restauração da comunidade edáfica ao longo do tempo em áreas pós-colheita de pinus, entre os 4 e 10 anos de regeneração e ainda, propor um índice para a avaliação da recuperação da fauna do solo em áreas de regeneração natural pós-colheita do pinus (Capítulo 3). O estudo foi realizado em uma região formada por campos nativos e remanescentes de Mata Atlântica, especificamente da Floresta Ombrófila Mista, do tipo Montana. As coletas foram realizadas fazendas florestais da empresa florestal, de papel e celulose Klabin S.A., nos municípios de Bocaina do Sul e Lages, no planalto sul de Santa Catarina, Brasil. A fauna do solo foi coletada em áreas de regeneração natural, áreas de plantio de pinus e de floresta natural pelos métodos do monólito de solo e de armadilhas de queda e, identificada base no nível taxonômico mais específico possível. Avaliaram-se também as propriedades químicas e físicas do solo e da serrapilheira, nas áreas com Cambissolo e Nitossolo com retirada recente do pinus e nas áreas de referência de uso anterior, destas áreas (pinus). Os resultados demonstraram que na comparação do pinus com as áreas de regeneração natural com retirada recente do pinus, tanto no Cambissolo, quanto no Nitossolo, houve mudanças na estrutura da comunidade e que, embora a recuperação da fauna do solo ocorra de forma diferente, ela já está ocorrendo, 4 anos após a retirada do pinus em qualquer tipo de solo (Capítulo 1). Ao longo da regeneração natural com Cambissolo, entre os 4 e 10 anos em regeneração houve redução de grupos dominante além de, aumento na complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo. Após 10 anos de regeneração natural, as áreas já haviam recuperado grupos com funções ecossistêmicas importantes, mas, ainda não se encontravam no patamar de abundância, diversidade funcional e estrutura da comunidade de áreas de floresta nativa (Capítulo 2). O índice de recuperação da fauna do solo proposto foi eficiente na diferenciação das áreas de estudo com resultados dentro do esperado, maiores valores para o índice na floresta,

seguidos das áreas de regeneração e com menores valores nas áreas de pinus (Capítulo 3). Como conclusão do estudo tem-se que os processos de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus se iniciam rapidamente, independentemente do tipo de solo e as propriedades do solo estão relacionadas com recuperação da fauna. A recuperação avança ao longo do tempo, mas, 10 anos de regeneração não são suficientes para alcançar uma estrutura de comunidade como de uma floresta natural. O índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus, proposto para este estudo teve resultados dentro esperado, mas, o método precisa de ajustes para o seu uso prático em atividades de monitoramento.

Palavras-chave: biologia do solo; regeneração natural; monitoramento.

GENERAL ABSTRACT

In each cycle, the forest farms undergo adjustments in the plantation stands and adaptations in areas destined for native vegetation. The new conservation areas present changes in the structure of the soil fauna community, due to the cultivation of pine for long periods. However, these changes can be recovered over time, naturally. The objective of this study was to evaluate the recomposition of the soil fauna community structure in Cambisols and Nitosols areas with recent pine removal (Chapter 1), to investigate how the edaphic community restoration process happens over time in post-harvest areas of pine, between 4 and 10 years of regeneration and also, to propose an index for the evaluation of the recovery of soil fauna in areas of natural regeneration post-harvest pine (Chapter 3). The study was carried out in a region formed by native fields and remnants of Atlantic Forest, specifically the Montana-type of Mixed Ombrophilous Forest. The collections were carried out on forestry farms of the forestry company Klabin S.A., in the municipalities of Bocaina do Sul and Lages, in the southern plateau of Santa Catarina, Brazil. Soil fauna was collected in areas of natural regeneration, areas of pine plantations and natural forest by soil monolith and pitfall trap methods and identified based on the most specific taxonomic level possible. The chemical and physical properties of soil and litter were also evaluated, in areas with Cambisol and Nitosol with recent removal of pine and in reference areas of previous use of these areas (pine). The results showed that in the comparison of pine with areas of natural regeneration with recent removal of pine, both in Cambisol and Nitosol, there were changes in the community structure and that, although the recovery of soil fauna occurs differently, it is already occurring, 4 years after the removal of pine in any type of soil (Chapter 1). During the natural regeneration with Cambisol, between 4 and 10 years of regeneration there was a reduction of dominant groups in addition to an increase in the complexity of the soil fauna community structure. After 10 years of natural regeneration, the areas had already recovered groups with important ecosystem functions, but were not yet at the level of abundance, functional diversity and community structure of native forest areas (Chapter 2). The proposed soil fauna recovery index was efficient in differentiating the study areas with results within the expected, higher values for the index in the forest, followed by the regeneration areas and with lower values in the pine areas (Chapter 3). As a conclusion of the study, the soil fauna recovery processes in post-harvest pine areas begin quickly,

regardless of soil type and soil properties are related to fauna recovery. Recovery progresses over time, but 10 years of regeneration is not enough to achieve a community structure like a natural forest. The soil fauna recovery index in post-harvest areas of pine, proposed for this study, had the expected results, but the method needs adjustments for its practical use in monitoring activities.

Key words: soil biology; natural regeneration; monitoring.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS	21
2 CAPÍTULO 1: RECOMPOSIÇÃO DA FAUNA DO SOLO EM ÁREAS DE REGENERAÇÃO NATURAL PÓS-COLHEITA DE PINUS EM NITOSSOLO E CAMBISSOLO	23
RESUMO	23
ABSTRACT	24
2.1 INTRODUÇÃO.....	24
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.2.1 Local de estudo	27
2.2.2 Coleta e caracterização da fauna do solo	29
2.2.3 Coleta e caracterização das propriedades do solo e da serrapilheira	30
2.2.4 Análise de dados	30
2.3 RESULTADOS.....	31
2.4 DISCUSSÃO.....	37
2.5 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	42
MATERIAL SUPLEMENTAR	46
3 CAPÍTULO 2: COMPOSIÇÃO E DIVERSIDADE DA FAUNA DO SOLO AO LONGO DA REGENERAÇÃO NATURAL DE MATA ATLÂNTICA PÓS- COLHEITA DE PINUS	50
RESUMO	50
ABSTRACT	51
3.1 INTRODUÇÃO.....	52
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.2.1 Local de estudo	55
3.2.2 Coleta e caracterização da fauna do solo	57
3.2.3 Análise de dados	58
3.3 RESULTADOS	59
3.4 DISCUSSÃO.....	67
3.5 CONCLUSÃO.....	71
REFERÊNCIAS	73
MATERIAL SUPLEMENTAR	77

3	CAPÍTULO 3: ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DA FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PÓS-COLHEITA DE PINUS	81
	RESUMO	81
	ABSTRACT	82
4.1	INTRODUÇÃO	82
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	84
4.2.1	Local de estudo	84
4.2.2	Coleta e caracterização da fauna do solo	87
4.2.3	Índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus	87
4.2.4	Indicadores	90
4.2.4.1	Indicador de dominância	90
4.2.4.3	Indicador de contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos	91
4.3	RESULTADOS	94
4.3.1	Índice de recuperação da fauna do solo	94
4.3.1	Indicador de dominância	97
4.3.2	Indicador de frequência de ocorrência	99
4.3.3	Indicador de contribuição dos grupos funcionais	101
4.4	DISCUSSÃO	103
4.4.1	Índice de recuperação da fauna do solo	103
4.4.2	Indicador de dominância	104
4.4.3	Indicador de frequência de ocorrência	105
4.4.4	Indicador de contribuição dos grupos funcionais	106
4.5	CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS	108
	MATERIAL SUPLEMENTAR	111
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS	116

1 INTRODUÇÃO GERAL

A integridade ecológica de muitos ecossistemas naturais está em risco de degradação devido as transformações causadas por diversos agentes antrópicos (p.ex. desmatamento, mudanças e uso intensivo do solo, monocultura). Estes distúrbios podem levar a redução na diversidade de espécies afetando as funções ecossistêmicas e a resiliência dos ecossistemas (SITHOLE e TANTSIS, 2021).

As funções ecossistêmicas podem ser classificadas como funções desenvolvidas por diversos elementos de um ecossistema para a sua manutenção, o que tem impacto direto ou indireto sobre a vida humana. Quando as funções ecossistêmicas têm impacto direto sobre a vida humana são chamados de serviços ecossistêmicos. Os principais serviços ecossistêmicos são: (i) provisão de alimentos, fibras e combustíveis; (ii) regulação dos ciclos da água e de elementos como o carbono e nutrientes; (iii) suporte de estruturas para prover o habitat dos organismos, incluindo os seres humanos (BACH e WALL, 2018; DELGADO-BAQUERIZO et al., 2020).

Os organismos da fauna do solo têm participação intrínseca na manutenção dos serviços ofertados pelo solo. A decomposição da matéria orgânica, uma função chave para os serviços de provisão e regulação, é realizada pela mesofauna e macrofauna do solo. Estes organismos realizam a fragmentação do material vegetal, gerando materiais que depois serão decompostos por microrganismos responsáveis pela ciclagem de nutrientes. Nos serviços de suporte, a macrofauna do solo atua na formação do solo e na provisão de habitat. Os engenheiros do ecossistema são grupos da fauna do solo capazes de alterar as propriedades físicas, afetando o fluxo de água e ar no solo, formando agregados e estruturas que são habitat para outros organismos (LAVELLE et al., 2014; BROWN et al., 2015; BACH e WALL, 2018). Estes são apenas alguns exemplos da participação da fauna do solo nas funções e serviços ecossistêmicos.

As atividades humanas colocam em risco a oferta e a manutenção destes serviços ecossistêmicos pela fragmentação das florestas nativas com consequente perda de biodiversidade, incluindo a diversidade edáfica. Nesse contexto, a Floresta Ombrófila Mista, formação vegetal do sul do Brasil, inserida na Mata Atlântica, é uma das fitofisionomias mais ameaçadas e fragmentadas em Santa Catarina. Esta formação inclui a Floresta Montana, entre altitudes de 400 a 1.000 m que se encontra em um alto nível de

fragmentação, necessitando de proteção e restauração (STEDILLE et al., 2018; MARTINS et al., 2017; KERSTEN et al., 2015; FOCKINK et al., 2020).

A fragmentação e degradação da Floresta Ombrófila Mista na região do planalto sul catarinense é resultante de atividades iniciadas entre as décadas de 40 e 70, período em que as florestas nativas foram intensamente perturbadas pela exploração da madeira do pinheiro (*Araucaria angustifolia*). No final da década de 60, antes mesmo do fim do ciclo da madeira, o reflorestamento com espécies exóticas nas áreas desmatadas da Floresta Ombrófila Mista, foi incentivado por instituições governamentais e tornou-se uma das formas de realizar a manutenção do setor madeireiro (FLORIANI e FERT NETO, 2011; HIGUCHI et al., 2012).

Atualmente, os plantios de espécies exóticas do planalto sul catarinense concentram-se nos municípios de Santa Cecília, Lages e Otacílio Costa, que juntos detém cerca de 90 mil hectares plantados, principalmente com *Pinus spp.* (ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS - ACR, 2019). O Estado de Santa Catarina possui área total com florestas plantadas de 828,9 mil hectares, onde cerca de 33% (273,5 mil ha) são de pinus. Do ponto de vista econômico, em 2018 o valor bruto da produção da silvicultura fechou em R\$ 1,38 bilhões em Santa Catarina. A região do planalto sul catarinense tem significativa participação nesse valor, já que corresponde a 40% da produção da silvicultura de Santa Catarina (ACR, 2019).

A silvicultura está inserida no contexto histórico do desenvolvimento da região do planalto sul catarinense e é uma atividade de elevada importância econômica para o Estado. No entanto, a condução de monoculturas florestais, sobretudo do pinus, tem efeitos sobre o solo durante a condução da cultura. No desenvolvimento do pinus há formação de uma serrapilheira uniforme advinda de uma única espécie, com baixa qualidade nutricional, o que afeta e altera a diversidade da fauna do solo e a oferta de serviços ecossistêmicos (CIFUENTES-CROQUEVIELLE et al., 2020; ORTIZ et al., 2022).

As empresas florestais, sabendo dos efeitos adversos sobre o ecossistema devido aos plantios de espécies exóticas e da situação de degradação das florestas nativas, têm estruturado suas fazendas na forma de mosaico, que mescla extensas áreas de plantios comerciais com vegetação natural (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2017). A criação de novos espaços para o desenvolvimento da vegetação natural é realizada por ajustes no layout dos plantios comerciais mais antigos. Neste processo, a primeira etapa é caracterizada

pela colheita do ciclo atual de pinus. Na segunda etapa, um novo ciclo do pinus é iniciado e parte da área que antes era destinada ao plantio, passa a ser destinada à regeneração natural do ecossistema pós-colheita de pinus.

A colheita do pinus pode alterar o solo, com variações na temperatura e umidade, desagregação, perda de nutrientes, remoção da biomassa vegetal acima do solo e perdas do estoque de carbono pela aceleração da decomposição das raízes, serrapilheira e matéria orgânica do solo, alterando a comunidade da fauna do solo, como a redução na abundância e diversidade (TULANDE-M et al., 2018; SIEBERS e KRUSE, 2019; MA et al., 2013). No entanto, a colheita é o primeiro passo para a restauração pós-colheita de pinus.

A restauração é uma forma de mitigar os impactos causados sobre integridade biológica dos ecossistemas. O sucesso de um processo de restauração é influenciado por vários fatores que incluem a intensidade e o tipo de degradação, as condições ambientais do local degradado como temperatura e nutrientes e ainda, fontes de biodiversidade e serviços ecossistêmicos em áreas próximas (SITHOLE e TANTSU, 2021).

Na regeneração natural, técnica passiva de restauração, as mudanças no ecossistema ocorrem em etapas intermediárias, ao longo do tempo, até o ecossistema recuperar a sua condição original do ambiente. Durante a regeneração natural, espécies vegetais menos estáveis são substituídas por outras mais estáveis ao longo do tempo (FRAGOSO et al., 2017). No entanto, as mudanças não ocorrem somente a nível de vegetação, mas, também, a nível de transformações no solo, principalmente por processos biológicos (BRADSHAW, 1997).

Ao longo do desenvolvimento da mata secundária, a complexidade das áreas aumenta em termos de composição da vegetação e da serrapilheira com efeitos sobre a biota do solo. Quanto maior o tempo de regeneração natural, mais as áreas tendem a apresentar características de composição da comunidade da fauna do solo similares as florestas naturais (AMAZONAS et al., 2018).

No estágio inicial, nos primeiros anos de retirada do pinus é observado o restabelecimento de grupos saprófagos especializados, que realizam a degradação do material de difícil digestão, as acículas de pinus ricas em lignina (TALUANE-M et al., 2018).

Com o passar do tempo, após a degradação parcial das acículas, ocorre o estabelecimento de gramíneas, em seguida há o estabelecimento de arbustos e árvores típicas de sucessão secundária. As melhorias na oferta e qualidade da serrapilheira, promovem incrementos na abundância dos organismos do solo. Com o aumento de recursos, torna-se possível o restabelecimento de outros grupos de saprófagos/transformadores da serrapilheira, atraindo também grupos predadores e assim, há melhorias na diversidade e complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo (CURRY e GOOD, 1992; REIS et al., 1999; TALUANE-M et al., 2018; YARWOOD et al., 2020).

Como visto a fauna do solo acompanha diversas mudanças na restauração dos ecossistemas ao longo do tempo e, por isso, é uma importante variável ecológica a ser estudada já que a composição da comunidade e a distribuição da abundância de indivíduos dentre os grupos, indicam mudanças ecológicas. Estas mudanças, refletem na qualidade do solo e em suas propriedades físicas, químicas e biológicas (YANG et al., 2021). A fauna do solo é, portando, um bioindicador, útil para o monitoramento da evolução e mudanças ocorridas no solo ao longo do tempo de restauração dos ecossistemas.

O presente estudo buscou entender como acontece a recuperação da biodiversidade do solo em áreas de regeneração natural com retirada recente do pinus (4 anos) em um Nitossolo e Cambissolo, tipos de solo típicos da Floresta Ombrófila Mista do sul do Brasil. A recomposição da fauna edáfica ao longo do tempo, entre os 4 e 10 anos de regeneração natural também foi avaliada, em relação a diversidade observada em áreas de floresta nativa. Por fim, com base nas modificações da estrutura da comunidade da fauna do solo ao longo do tempo, buscou-se identificar bioindicadores e compor um índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus. O objetivo foi propor um índice que, pudesse ser utilizado em estudos de monitoramento da qualidade do solo, em processos de regeneração de floresta natural pós-colheita de pinus.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo geral monitorar a biodiversidade da fauna edáfica, sua abundância, riqueza de grupos e modificações na estrutura da comunidade ao longo do tempo de regeneração natural de áreas pós-colheita de pinus, em diferentes solos. Além de, identificar bioindicadores de recuperação de áreas pós-colheita, na região do planalto sul catarinense.

Para isso foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar como o processo de recomposição da estrutura da comunidade da fauna do solo em áreas pós-colheita com retirada recente dos plantios de *Pinus ssp.*, em solos com diferentes propriedades edáficas (Capítulo 1);
2. Investigar como acontece o processo de restauração da comunidade edáfica ao longo do tempo em áreas pós-colheita de pinus, verificando se realmente há melhorias na composição da fauna edáfica e em que ritmo e condições acontece a recomposição da diversidade, em comparação a diversidade observada em plantios de pinus e na floresta nativa (Capítulo 2);
3. Propor um índice de recuperação das áreas pós-colheita de pinus com base na fauna do solo. A avaliação do índice foi realizada para 4 e 10 anos de regeneração natural, utilizando como referência, áreas de pinus e de floresta secundária (Capítulo 3).

1.2 HIPÓTESES

As seguintes hipóteses foram testadas:

1. Os efeitos do pinus na comunidade da fauna do solo são representados por reduções na abundância e diversidade de grupos da macro e mesofauna do solo e pela promoção da dominância de grupos específicos, o que é revertido durante o processo de recomposição da biota do solo. Mudanças na diversidade e estrutura das comunidades da fauna edáfica são observadas 4 anos após a colheita do pinus, independentemente do tipo de solo.

2. O tipo de solo e suas propriedades influenciam na recomposição da comunidade edáfica em áreas pós-colheita de pinus.

3. É possível compor um índice, que demonstre os avanços na recuperação da estrutura da comunidade da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus, ao longo do tempo, através do uso de indicadores de características da comunidade da fauna do solo.

Esta tese está dividida em três capítulos que atendem os objetivos específicos e as hipóteses.

REFERÊNCIAS

- AMAZONAS, N.T.; VIANI, R.G.A.; REGO, M.G.A.; CAMARGO, F.F., FUJIHARA, R.T., VALSECHI, O.A. Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 3, p. 449–456, 2018.
- ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS – ACR. **Anuário Estatístico de Base Florestal para o estado de Santa Catarina 2019**. ACR, Lages, 2019.
- BACH, E.M.; WALL, D.H. Trends in Global Biodiversity: Soil Biota and Processes. In: DELLASALA, D.A.; GOLDSTEIN, M.I. **Encyclopedia of the Anthropocene**. Elsevier, 2018.
- BRADSHAW, A. Restoration of mined lands – using natural processes. **Ecological Engineering**, v. 8, p. 255-269, 1997.
- BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G; FERREIRA, S.A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G.A.; PASINI, A.; BARTZ, L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M., GARCIA, J.R., OLIVEIRA E.B., BROWN, G.G, PRADO, RB. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- CIFUENTES-CROQUEVIELLE, C.; STANTON, D.E.; ARMESTO, J.J. Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020.
- DELGADO-BAQUERIZO, M.; PETER B. REICH, P.B.; CHANDA T.C.; ELDRIDGE, D.J.; ABADES, S.A.; ALFARO, F.D.; BASTIDA, F.; BERHE, A.A.; CUTLER, N.A.; GALLARDO, A.; GARCÍA-VELÁZQUEZ, L.; HART, S.C.; HAYES, P.E.; HE, J.Z.; HSEU, Z.Y.; HU, H.W.; KIRCHMAIR, M.; NEUHAUSER, S.; PÉREZ, C.A.; REED, S.C.; SANTOS, F.; SULLIVAN, B.W.; TRIVEDI, P.; WANG, J.T.; GRULLON, L.W.; WILLIAMS, M.A.; SINGH, B.K. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. **Nature Ecology & Evolution**, v. 4, p. 210–220, fev. 2020.
- FLORIANI, G.S.; FERT NETO, J. A trajetória do uso do solo por florestas na região dos campos de Lages. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 10, n. 2, p. 93-102, 2011.
- FOCKINK, G.D.; ZANGALLI, D.; OLIVEIRA, E.; LUZ, GOES, M.P.; SILVA, A.S.; FLORIANI, M.M.P.; NICOLETTI, M.F.; KANIESKI, M.R. Ecological indicators of passive restoration in South Brazil’s Atlantic Forest areas with former *Pinus taeda* L. plantations. **Ecological Engineering**, v. 179, jun., 2022.
- FRAGOSO, R.O.; CARPANEZZI, A.A.; KOEHLER, H.S.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C. Barreiras ao Estabelecimento da Regeneração Natural em Áreas de Pastagens Abandonadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1451-1464, dez., 2017.

HIGUCHI, P.; SILVA, A.C.; FERREIRA, T.S.; SOUZA, T.S.; GOMES, J.P.; SILVA, K.M.; SANTOS, K.F.; LINKE, C.; PAULINO, P.S. Influência de Variáveis Ambientais sobre o Padrão Estrutural e Florístico do Componente Arbóreo, em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 79-90, jan.-mar., 2012.

KERSTEN, R. A.; BORGIO, M.; GALVÃO, F. Floresta Ombrófila Mista: aspectos fitogeográficos, ecológicos e métodos de estudo. In: EISENLOHR, P.V.; FELFILI, J.M.; MARIA MELO, M.M.R.F.; ANDRADE, L.A.; MEIRA NETO, J.A.A. Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015.

LAVELLE, P.; MOREIRA, F.; SPAIN, A. Biodiversity: Conserving Biodiversity in Agroecosystems. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, v. 2, p. 41-60, 2014.

MA, Y.; GENG, Y.; HUANG, Y.; SHI, Y.; NIKLAUS, P. A.; SCHMID, B.; HE, J. Effect of clear-cutting silviculture on soil respiration in a subtropical forest of China. **Journal of Plant Ecology**, v. 6, n. 5, p. 335-348, out., 2013. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt038>

MARTINS, P. J.; MAZON, J. A.; Martinkoski, L.; BENIN, C. C.; Watzlawick, L. F. Dinâmica da Vegetação Arbórea em Floresta Ombrófila Mista Montana Antropizada. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.097014>

OLIVEIRA, Y.M.M.; OLIVEIRA, E.B. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

ORTIZ, D.C.; SOUZA, T.A.F.; PECH, T.M.; BARTZ, M.L.C.; BARETTA, D.; SIMINSKI, A.; NIEMEYER, J.C. Soil ecosystem changes by vegetation on oldfield sites over five decades in the Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Forestry Research**, v. 33, p. 667-677, 2022.

SIEBERS, N.; KRUSE, J. Short-term impacts of forest clear-cut on soil structure and consequences for organic matter composition and nutrient speciation: A case study. **Plos One**, ago., 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220476>

SITHOLE, H.; TANTSI, N. Ants as Indicators of Terrestrial Ecosystem Rehabilitation Processes. In: RANZ, R.E.R. **Arthropods**. Intechopen, 2021.

STEDILLE, L.I.B.; GOMES, J.P.; COSTA, N.C.F.; VARGAS, O.F.; LUZ, L.; MANTOVANI, A. Passive restoration of mixed ombrophilous forest a decade after forest plantation removal in the South of Brazil, **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 523-534. 2018. <https://doi.org/10.5380/ufv.v48i4.55319>.

TULANDE-M, E., BARRERA-CATAÑO, J.I., ALONSO-MALAYER, C.E., MORANTES-ARIZA, C., BASTO, S., SALCEDO-REYES, J.C. Soil macrofauna in areas with different ages after *Pinus patula* clearcutting. **Universitas Scientiarum**, v. 23, n. 3, p. 383-417, 2018.

YANG, X.; SHAO, M.; LI, T.; GAN, M.; CHEN, M. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau. **Ecological Indicators**, v. 122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.10723>

2 CAPÍTULO 1: RECOMPOSIÇÃO DA FAUNA DO SOLO EM ÁREAS DE REGENERAÇÃO NATURAL PÓS-COLHEITA DE PINUS EM NITOSSOLO E CAMBISSOLO

RESUMO

O monocultivo do pinus é uma atividade econômica importante, mas que afeta a estrutura da comunidade e serviços oferecidos pela fauna do solo. A criação de áreas que visem a restauração do ambiente natural pode mitigar os efeitos do pinus sobre a comunidade do solo e recuperar a oferta de serviços da fauna edáfica. Pouco tempo após a retirada do pinus, já se espera observar indícios de recuperação da diversidade da fauna do solo, em função das transformações nas condições edáficas do solo. O objetivo do estudo foi avaliar a recomposição da estrutura da comunidade da fauna do solo em áreas pós-colheita com retirada recente do pinus. Foram avaliadas áreas pós-colheita de pinus em recuperação há 4 anos e áreas adjacentes com cultivos jovens de pinus, em dois solos predominantes (Cambissolo e Nitossolo). Os resultados mostraram que na comparação do pinus com as áreas de regeneração natural nos dois tipos de solo, houve mudanças na estrutura da comunidade e no ressurgimento de grupos ligados a transformação da serrapilheira e predação. O Nitossolo se destacou nas mudanças na abundância dos grupos Formicidae e Collembola e no ressurgimento de grupos de engenheiros do ecossistema. A umidade do solo, o cálcio e resistência a penetração foram as propriedades edáficas que se correlacionaram com fauna do solo na regeneração com Cambissolo; com Nitossolo foram a umidade, o diâmetro médio ponderado de agregados. Embora a recuperação da fauna do solo ocorra de forma diferente, ela já está ocorrendo, 4 anos após a retirada do pinus em qualquer tipo de solo.

Palavras-chave: pós-colheita de pinus, recomposição, fauna do solo, propriedades do solo.

ABSTRACT

Pine monoculture is an important economic activity, but it affects the community structure and services offered by the soil fauna. The creation of areas aimed at restoring the natural environment can mitigate the effects of pine on the soil community and recover the services offered by the edaphic fauna. Shortly after the removal of pine, it is expected to see signs of recovery of soil fauna diversity, due to changes in soil edaphic conditions. The objective of the study was to evaluate the recomposition of the soil fauna community structure in post-harvest areas with recent pine removal. Post-harvest areas of pine in recovery for 4 years and adjacent areas with young pine plantations were evaluated, in two predominant soils (Cambisol and Nitosol). The results showed that in the comparison of pine with areas of natural regeneration in both types of soil, there were changes in the community structure and in the resurgence of groups linked to litter transformation and predation. The Nitosol stood out in the changes in the abundance of the Formicidae and Collembola groups and in the resurgence of groups of ecosystem engineers. Soil moisture, calcium and penetration resistance were the edaphic properties that correlated with soil fauna in the regeneration with Cambisol; with Nitosol were moisture, weighted average diameter of aggregates. Although the recovery of soil fauna occurs differently, it is already taking place, 4 years after the removal of pine in any type of soil.

Key words: post-harvest pine, recomposition, soil fauna, soil properties.

2.1 INTRODUÇÃO

O monocultivo do pinus constitui uma importante atividade econômica. Na região sul do Brasil, ele expandiu-se entre a década de 60 e 70, para suprir as demandas das indústrias de papel e celulose, da siderurgia e da secagem de grãos. Desde então, esta atividade tem se consolidado em termos de produtividade e de mercado (SNIF, 2020; MOREIRA et al., 2017; DOBNER JR e QUADROS, et al., 2019).

Apesar da importância econômica, a introdução e condução de monoculturas de espécies exóticas, como a do pinus, tem consequências ecológicas negativas sobre a diversidade e os habitats de muitos grupos da fauna do solo (KAMCZYC et al., 2019). Muray et al. (2009) verificaram perdas de diversidade da fauna do solo presente na

serrapilheira oriunda de *Pinus radiata* em comparação com a floresta nativa. Estes autores associaram as perdas de biodiversidade com redução da heterogeneidade do habitat observada em plantações de pinus, em condições de clima subtropical.

Os plantios de pinus são ambientes de serrapilheira homogênea formada por uma espessa camada de acículas, material de degradação lenta por ser rico em substâncias recalcitrantes como a lignina e compostos fenólicos inibidores (MURAY et al., 2009; TULANDE-M et al., 2018). A serrapilheira representa o habitat e o recurso alimentar de muitos grupos da meso e macrofauna do solo, entretanto, apenas alguns grupos especializados são capazes de metabolizar a serrapilheira formada por acículas (TULANDE-M et al., 2018). Pech et al. (2021) no clima subtropical, ao avaliar a decomposição de acículas de plantios de *Pinus taeda*, observaram que a fauna do solo típica do bioma Mata Atlântica, teve pouca participação na degradação das acículas e que este material não é um recurso alimentar capaz de sustentar a ampla diversidade de organismos macro e mesofauna de solos subtropicais. De igual modo, Ortiz et al. (2022) no clima subtropical, também observaram baixa diversidade da comunidade da fauna do solo em áreas de *Pinus elliottii*, devido à baixa qualidade dos recursos alimentares proporcionada pelas acículas de pinus. Também reportaram efeitos negativos sobre a abundância de organismos do grupo de transformadores de serrapilheira (p.ex. Coleoptera, Diplopoda e Isopoda).

As perdas de biodiversidade, sobretudo de grupos de transformadores de serrapilheira, afetam os processos de decomposição com consequente redução da oferta de serviços ecossistêmicos, como a ciclagem de nutrientes. Isto porque, a fragmentação da serrapilheira dá-se especificamente pela ação da fauna do solo (CORREIA e OLIVEIRA, 2005). Aliado a isso, a oferta de outros serviços como a predação e o controle populacional da biota do solo podem ser comprometidos a longo prazo. Neste sentido, Ortiz et al. (2022) observaram que grupos de predadores como Chilopoda e Dermaptera e ainda de ácaros micropredadores, ocorriam apenas em áreas de vegetação nativa e não em plantios de pinus.

Recentemente, áreas de plantio de pinus vêm sendo convertidas em espaços destinados a regeneração natural. A restauração destas áreas é uma forma de mitigar os impactos causados sobre integridade biológica dos ecossistemas incluindo a biodiversidade do solo e seus serviços (SITHOLE e TANTSI, 2021). Entretanto, poucos

são os estudos que consideram a recuperação da qualidade do solo e de suas propriedades, especialmente a sua biodiversidade, ao longo do processo de regeneração natural.

O restabelecimento da fauna edáfica após a colheita de pinus em solos tropicais, depende inicialmente da degradação da serrapilheira de acículas por microrganismos saprófitos especializados na degradação da lignina, como observado por Tulande-M et al. (2018). Com o avanço do processo de degradação, o material orgânico torna-se mais apropriado para outros grupos de organismos saprófagos/transformadores da serrapilheira. Os grupos de artrópodes saprófagos/transformadores da serrapilheira são considerados chave nos processos de restauração do solo já que, sustentam o restabelecimento de organismos de níveis tróficos mais elevados o que, aumenta a diversidade e a complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo (TULANDE-M et al., 2018; YARWOOD et al., 2020).

A diversidade e funcionalidade da fauna edáfica é influenciada pelas propriedades químicas e físicas do solo e por sua vez também as modifica ao longo de sua atividade. A presença de grupos da macrofauna pode ser relacionada com os nutrientes do solo, liberados pela degradação da matéria orgânica da serrapilheira. Na física do solo, tem-se a compactação do solo como um dos possíveis efeitos da retirada do pinus. A compactação afeta a porosidade e densidade do solo e em consequência, os grupos que vivem no interior do solo ou aqueles que para buscam o solo como refúgio (TULANDE-M et al., 2018).

O monitoramento de espaços degradados, como as áreas pós-colheita de pinus, é um dos esforços importantes para indicar se o progresso na restauração dos ecossistemas está sendo alcançado. No entanto, o monitoramento por períodos curtos é insuficiente já que as transformações que ocorrem acima e abaixo do solo podem levar décadas (SITHOLE e TANTSI, 2021; WILLIAMS et al., 2020). Nesse sentido, verifica-se que, os processos de recuperação da fauna do solo, precisam ser avaliados ao longo do tempo, mas que nos primeiros anos após a retirada do pinus já é possível observar indícios de recuperação da diversidade da fauna do solo em função das transformações nas condições edáficas do solo, independentemente do tipo de solo.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar como se dá processo de recomposição da comunidade da fauna do solo após 4 anos de regeneração natural em áreas pós-colheita de pinus, em comparação com o uso anterior (plantio de pinus). Este contexto foi avaliado para dois solos predominantes, Nitossolo e Cambissolo, na mesma zona climática no planalto sul de Santa Catarina. A hipótese deste estudo é de que a

recomposição da fauna edáfica varia com o tipo de solo e que estas modificações podem ser percebidas aos 4 anos de regeneração em qualquer um dos solos.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local de estudo

O estudo foi realizado nos municípios de Bocaina do Sul e Lages, localizados no planalto sul de Santa Catarina, Brasil, em duas fazendas florestais da empresa Klabin S.A. A região é formada por campos nativos e remanescentes de Mata Atlântica, especificamente da Floresta Ombrófila Mista, do tipo Montana. O clima da região é mesotérmico úmido (Cfb) pela classificação Köppen (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2020a; GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2020b; CARVER et al., 2002).

A fazenda florestal situada em Bocaina do Sul (27°44'04.7" S; 49°59'36.7"O), encontra-se a uma altitude de 860 m e apresenta como classe de solo predominante o Cambissolo húmico alumínico. A fazenda florestal localizada em Lages (27°52'16.0" S; 50°17'44.6" O), apresenta altitude de 916 m, e tem com classe de solo predominante o Nitossolo vermelho distroférico.

Em cada fazenda foram selecionadas 3 áreas pós-colheita de pinus com 4 anos de regeneração natural em Áreas de Preservação Permanente (APP's) e 3 áreas adjacentes de pinus com 3 anos, totalizando 2 tratamentos e 6 unidades amostrais, em cada fazenda.

Na fazenda de Bocaina do Sul (Cambissolo) o trabalho de campo do estudo foi realizado no verão de 2019, quando a temperatura média variou entre 17 e 26 °C com precipitação média de 3,6 mm, entre os dias de coleta. Já na fazenda em Lages (Nitossolo) o trabalho de campo foi realizado no verão de 2020, onde a temperatura média variou entre 12 e 22 °C com precipitação média de 0,33 mm, entre os dias de coleta.

Tabela 1. Histórico e caracterização das áreas de estudo.

Unidade amostral	Histórico e caracterização
Regeneração (REGEN) – Cambissolo REGEN – Cambi	Localização: Bocaina do Sul/SC. Solo predominante: Cambissolo húmico alumínico. Áreas com plantio de <i>P.taeda</i> até 2015. Áreas de Preservação Permanente (APP) com regeneração natural de 4 anos, em processo inicial de regeneração da vegetação secundária (arbustos, ervas e gramíneas). Solo recoberto por gramíneas, com alguns vestígios de deposição de restos culturais da colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
Pinus (PINUS) – Cambissolo PINUS – Cambi	Localização: Bocaina do Sul/SC. Solo predominante: Cambissolo húmico alumínico. Áreas com plantio de <i>P.taeda</i> em 3º ciclo de colheita, idade do plantio: 3 anos. Áreas com árvores de pinus de pequena estatura. Áreas apresentavam boa parte do solo descoberto, mas, com alguns vestígios de restos culturais da última colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
Regeneração – Nitossolo REGEN – Nito	Localização: Lages/SC. Solo predominante: Nitossolo vermelho distroférico. Áreas com plantio de <i>P.taeda</i> até 2016. Áreas de APP com regeneração natural de 4 anos, em processo inicial de regeneração da vegetação secundária (arbustos, ervas e gramíneas). Solo recoberto por gramíneas, com alguns vestígios de deposição de restos culturais da colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
Pinus – Nitossolo PINUS – Nito	Localização: Lages/SC Solo: Nitossolo vermelho distroférico. Áreas com plantio de <i>P.taeda</i> em 3º ciclo de plantio, idade do plantio 3 anos. Áreas com árvores de pinus de pequena estatura. Plantios apresentavam boa parte do solo descoberto, mas, com alguns vestígios de restos culturais da última colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).

Em cada unidade amostral foram estabelecidos 3 transectos com 6 pontos amostrais espaçados 30 m entre si, totalizando 18 pontos amostrais para cada tratamento ($n = 18$). Uma distância de 45 m foi mantida entre os transectos estabelecidos nas áreas de regeneração e pinus (Figura S1).

2.2.2 Coleta e caracterização da fauna do solo

A fauna do solo foi coletada em cada ponto amostral das áreas de regeneração com Cambissolo e Nitossolo, pelos métodos do monólito de solo e de armadilhas de queda. O método do monólito foi usado para coleta da macrofauna do solo e da serrapilheira, conforme Anderson e Ingram (1993). A armadilha de queda foi usada para a coleta da macrofauna e mesofauna da superfície do solo, conforme descrito por Baretta et al. (2014). Os organismos da fauna do solo foram identificados com base no nível taxonômico mais específico possível, com auxílio de um microscópio estereoscópico com aumento de 50 vezes. Os grupos Formicidae e Aphinidae foram classificados a nível de família, Chilopoda, Diplopoda, Symphyla, e Gastropoda a nível de classe e Oligochaeta em subclasse. Para os grupos Araneae, Blattodea, Coleoptera, Collembola, Dermaptera, Hemiptera, Isopoda, Opiliones, Orthoptera, Diptera, Pseudoscorpionida a classificação foi ao nível de ordem e para Isoptera de subordem.

Com a identificação dos organismos, foi determinada a riqueza (n° de grupos amostrados), a abundância total e a abundância por grupo taxonômico, considerando todos os organismos coletados pelos dois métodos de coleta usados. Calculou-se ainda a abundância relativa (AR) dos grupos taxonômicos, representando o percentual de indivíduos em cada grupo em relação ao total de organismos amostrados.

Com base na abundância e riqueza da fauna do solo foram determinados os índices de dominância de Simpson de Simpson (D'), diversidade de Shannon (H') e equabilidade de Pielou (J'), calculados pelo software Past 4.03 (HAMMER et al., 2001).

2.2.3 Coleta e caracterização das propriedades do solo e da serrapilheira

Nas áreas de regeneração com Cambissolo e Nitossolo, foram coletadas 12 amostras de solo a profundidade de 10 cm utilizando trado holandês ao redor de cada ponto de amostragem resultando em uma amostra composta. As amostras compostas de solo foram homogeneizadas para a determinação do pH em água, Ca^{2+} , Mg^{2+} e umidade do solo conforme metodologia de Tedesco et al. (1995). Os teores de C e N total foram determinados em equipamento multi N/C® 2100 - Analytic Jena AG. O teor de C na biomassa microbiana do solo (C_{mic}) foi determinado pelo método da Fumigação-Extração (FE) (VANICE et al., 1987).

Amostras indeformadas de solo em anéis foram coletadas para determinação da porosidade total em mesa de tensão de areia (EMBRAPA, 2011) e da resistência a penetração pelo penetrômetro de bancada Marconi modelo Ma-933®, na tensão de 10 kPa. A estabilidade de agregados foi determinada em monólitos de solo (dimensões de 0,1 m x 0,2 m x 0,1 m) coletados em cada ponto amostral, calculado como diâmetro médio ponderado de agregados (LUCIANO et al., 2010).

Amostras de serrapilheira depositada na superfície do solo foram coletadas utilizando quadro vazado de dimensões de 0,2 m x 0,2 m (0,04 m²). A serrapilheira foi seca em estufa a temperatura de 60°C, até peso constante para determinação da biomassa seca por m². Foram determinados na serrapilheira os teores de C e N total utilizando o equipamento multi N/C® 2100 - Analytic Jena AG.

2.2.4 Análise de dados

Com base nas medidas de abundância dos grupos taxonômicos (n° indivíduos por ponto amostral), foi realizada a análise permutacional multivariada de variância (PERMANOVA) (utilizando o índice de Bray-Curtis da matriz de dados). O objetivo da PERMANOVA foi verificar se existe dissimilaridade entre as comunidades da fauna do solo nos diferentes tratamentos. Para tanto, realizou-se main e pair-wise tests com o cálculo do pseudo-F e p ($p \leq 0,05$). Análises de porcentagem de similaridade (SIMPER) foram realizadas comparando as áreas de regeneração com as de pinus adjacentes em cada classe de solo quando identificadas variações entre os tratamentos. A análise de SIMPER foi utilizada para determinar quais grupos taxonômicos mais contribuíram para a

dissimilaridade entre os tratamentos. Neste caso, considerou-se apenas as contribuições maiores de 5%.

Realizou-se também uma análise de coordenadas principais (PCoA) para ordenação dos grupos taxonômicos nos diferentes tratamentos e ainda, para identificar os grupos de maior correlação com cada tratamento/unidade amostral (correlação de Pearson $> 0,2$). A PCoA e SIMPER foram analisadas somente quando PERMANOVA foi significativa ($p \leq 0,05$) na comparação do pair-wise test. As análises multivariadas foram realizadas no software Primer 6 & Permanova (ANDERSON et al., 2008).

As propriedades do solo e da serrapilheira (propriedades edáficas) foram comparadas entre REGEN–Cambi *versus* PINUS–Cambi e entre REGEN–Nito *versus* PINUS–Nito. O objetivo foi utilizar as análises para auxiliar no entendimento de como as diferenças nas condições edáficas de cada sistema em regeneração, com relação ao pinus (uso anterior), influenciam a recomposição da comunidade da fauna do solo. Os dados referentes as propriedades químicas, físicas e microbiológicas do solo e a biomassa, carbono e nitrogênio da serrapilheira foram submetidos ao teste de médias não-paramétrico de Kruskal Wallis, pelo software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Para entender com os grupos da fauna do solo se correlacionam e interagem com as propriedades edáficas na regeneração com Cambissolo e Nitossolo foi realizada a análise de redes neurais, através do software Gephi 0.9 (BASTIAN, M., et al., 2009). Utilizou-se como base as correlações de Spearman significativas ($p \leq 0,05$), entre a abundância dos grupos taxonômicos e as propriedades edáficas, no software R Studio versão 1.4.1103 com os pacotes BiocManager e Multtest (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2022).

2.3 RESULTADOS

No Cambissolo, na regeneração, foi observada uma abundância de 2.269 organismos e a presença de 20 grupos taxonômicos da fauna do solo. Nas áreas de pinus adjacentes as áreas de regeneração, foram observados 14 grupos e uma abundância total de 1.790 indivíduos. No Nitossolo, a regeneração apresentou uma riqueza de 16 grupos taxonômicos e abundância total de 1.375 organismos. Nas áreas de pinus adjacentes foram observados 10 grupos e um total de 812 indivíduos.

No Cambissolo e Nitossolo a diversidade de grupos taxonômicos, representada pelo índice de diversidade (H'), apresentou maiores valores nas áreas de regeneração do que os apresentados nas áreas de pinus. O mesmo comportamento foi observado para a equabilidade, representada pelo índice de Pielou (J'). A dominância de Simpson (índice D'), apresentou valores maiores nas áreas de pinus do que nas áreas de regeneração, em ambos os solos (Tabela 2). Entre a regeneração com Cambissolo e Nitossolo, observou-se maior índice H' e J' no Nitossolo, além de menor índice D' .

Tabela 2. Índices de diversidade das áreas de Cambissolo e Nitossolo.

Áreas	Diversidade de Shannon H'	Equabilidade de Pielou J'	Dominância de Simpson D'
REGEN–Cambi	1,02	0,53	0,53
PINUS–Cambi	0,65	0,39	0,70
REGEN–Nito	1,19	0,85	0,47
PINUS–Nito	0,74	0,65	0,58

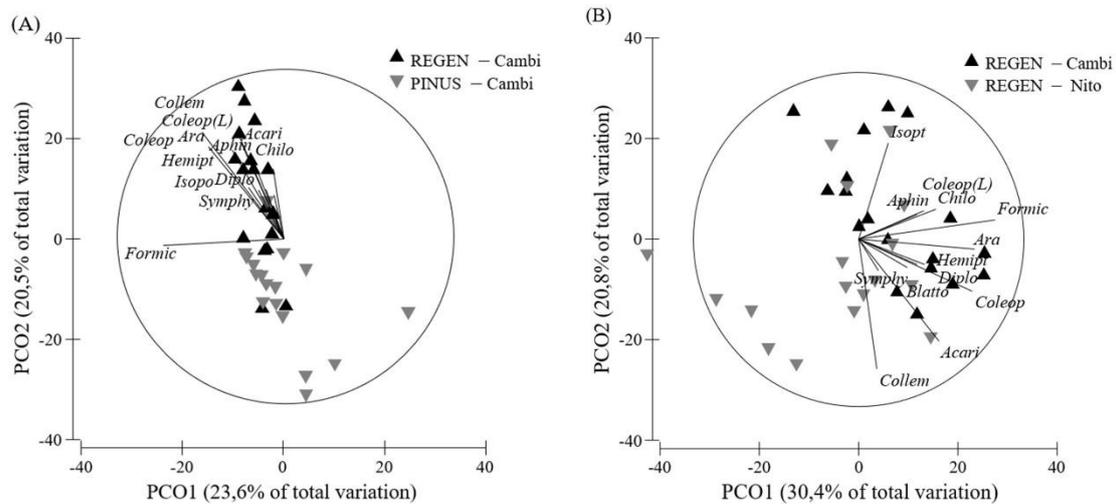
Descrição das áreas vide Tabela 1.

A PERMANOVA revelou diferenças significativas (pseudo-F = 9,26; $p = 0,001$) na comunidade da fauna do solo entre as áreas estudadas, com base na abundância dos grupos identificados. O resultado do pair-wise test indicou a separação entre os tratamentos REGEN–Cambi e PINUS–Cambi (pseudo-F = 2,36 e $p = 0,001$) mas não houve diferença entre REGEN–Nito e PINUS–Nito (pseudo-F = 1,40 e $p = 0,092$). Para REGEN–Cambi e REGEN–Nito, o pair-wise test indicou a separação entre os tratamentos (pseudo-F = 2,08 e $p = 0,001$).

Na análise de PCoA os vetores representam a correlação da abundância dos grupos taxonômicos com a ordenação da estrutura da comunidade da fauna do solo. No Cambissolo, os grupos Formicidae, Collembola, Coleoptera (Larva), Coleoptera e Araneae foram os principais correlacionados com a regeneração natural e nenhum grupo correlacionou-se com o pinus (Figura 1A).

Na regeneração do Cambissolo e Nitossolo, os grupos Isoptera, Coleoptera e Formicidae foram correlacionados com ordenação da estrutura da comunidade da regeneração com Cambissolo, já Collembola e Acari tiveram maior correlação com a ordenação da estrutura da comunidade da regeneração com Nitossolo (Figura 1B).

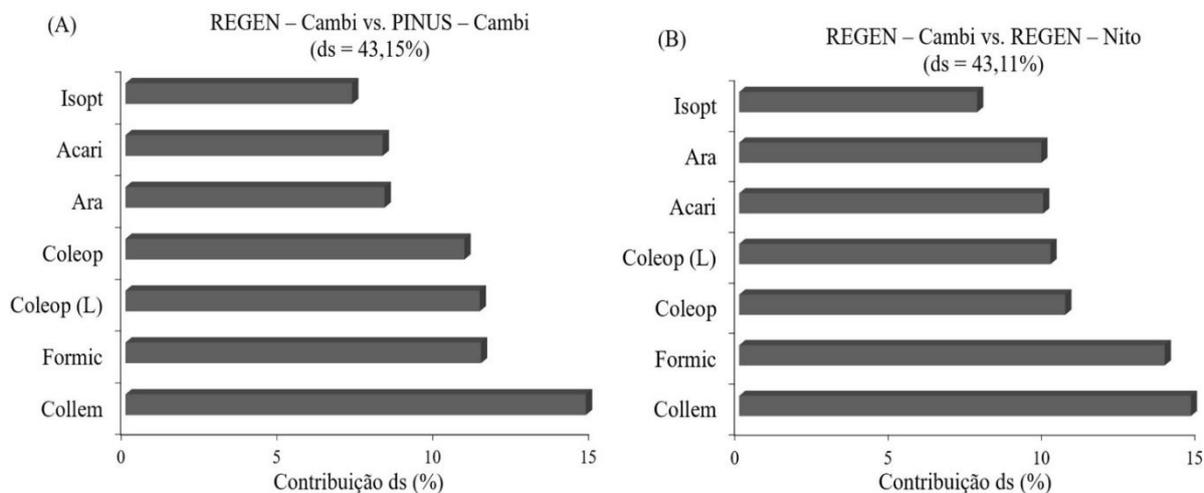
Figura 1. Ordenação (análise de Coordenadas Principais - PCoA) da abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas de regeneração e pinus com Cambissolo (A) e com Nitossolo (B).



Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Aphin = Aphinidae, Ara = Araneae, Blatto = Blattodea, Chilo = Chilopoda, Coleop = Coleoptera, Coleop (L) = Coleoptera (Larva), Collem = Collembola, Derma = Dermaptera, Diplo = Diplopoda, Dipt (L) = Diptera (Larva) Formic = Formicidae, Gastrop = Gastropoda, Hemipt = Hemiptera, Isopo = Isopoda, Isopt = Isoptera, Symphy = Symphyla, Oligo = Oligochaeta, Opilio = Opiliones, Ortho = Orthoptera.

No Cambissolo os principais grupos taxonômicos responsáveis pelas diferenças entre a regeneração e o pinus foram Collembola, responsável por 14,75% da dissimilaridade além de, Formicidae (11,39%), Coleoptera (Larva) (11,35%), Coleoptera (10,86%), Araneae (8,30%), Acari (8,24%), Isoptera (7,26%) (Figura 2A). Na regeneração com Cambissolo e Nitossolo, os grupos que indicaram dissimilaridade entre as áreas foram Collembola com dissimilaridade de 14,71%, Formicidae (13,86%), Coleoptera (10,62%), Coleoptera (Larva) (10,14%), Acari (9,90%), Araneae (9,84%) e Isoptera (7,75%) (Figura 2B).

Figura 2. Percentual de contribuição dos grupos da fauna edáfica para a dissimilaridade* entre as áreas de regeneração e pinus no Cambissolo (A) e entre as áreas de regeneração no Cambissolo e Nitossolo (B).



Descrição das áreas *vide* Tabela 1. ds = dissimilaridade, vs.= versus. Descrição dos grupos da fauna *vide* Figura 1. *Determinado por análise de SIMPER.

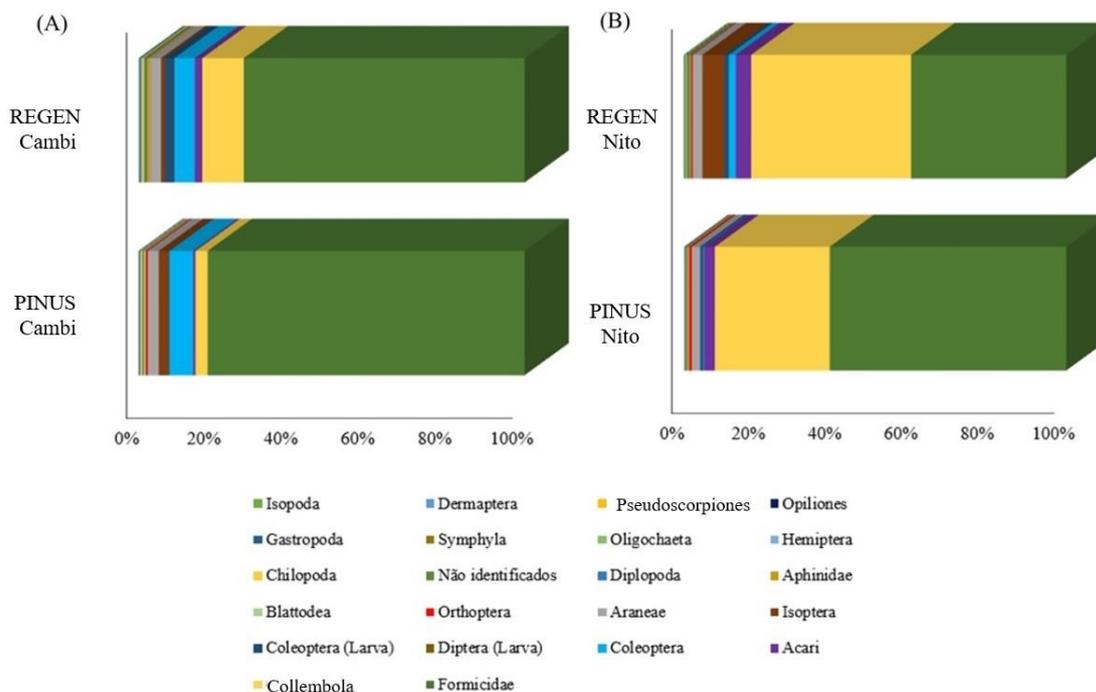
No Cambissolo, o grupo Formicidae se destacou por ser o grupo de maior AR na regeneração e no pinus, com abundância relativa (AR) de 82,12% e 72,76% respectivamente. Observou-se entre o pinus e a regeneração, uma redução de 9,36% na AR deste grupo (Figura 3A). Por outro lado, o grupo Collembola aumentou sua AR em 7,63% entre o pinus e a regeneração com Cambissolo. Isto também foi observado para os grupos Coleoptera (Larva) e Acari, com aumentos de 2,21% e 1,32% respectivamente, entre o pinus e a regeneração. Foram observados na regeneração com Cambissolo, grupos que não foram encontrados no pinus, como Isopoda, Dermaptera, Shympyla e Diptera (Larva), com AR menor do que 0,2% (Figura 3A).

No Nitossolo, os grupos Formicidae e Collembola foram os de maior AR na regeneração e no pinus. O grupo Formicidae apresentou AR de 40,58% na regeneração e 61,81% no pinus. Houve, portanto, uma redução de 21,24% na AR do grupo Formicidae entre o pinus e a regeneração. Para o grupo Collembola foi encontrada AR de 30,05% no pinus e 41,82% na regeneração. Assim, o aumento na AR deste grupo foi de 11,77% entre o pinus e a regeneração (Figura 3B). Outros grupos taxonômicos também que aumentaram sua AR entre o pinus e a regeneração, como Coleoptera que, aumentou sua AR em 1,57% entre a regeneração e pinus. O grupo Coleoptera (Larva) aumentou sua AR em 0,35% entre o pinus e a regeneração.

Observou-se na regeneração com Nitossolo, grupos que não foram encontrados no pinus, como Opiliones, Oligochaeta, Chilopoda, Diplopoda e Isoptera. Destes grupos,

Opiliones, Oligochaeta, Chilopoda, Diplopoda tiveram AR menor do que 0,4% e Isoptera teve AR de 5,82% (Figura 3B). Os dados completos da abundância da fauna do solo nas áreas estudadas, encontra-se na Tabela S1. Na Tabela S2 está a contribuição de cada grupo para a AR.

Figura 3. Abundância relativa (AR) em % dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas de regeneração e de pinus para o Cambissolo (A) e Nitossolo (B).



Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

No Cambissolo houve mudanças significativas nas propriedades do solo entre o pinus e a regeneração. No que tange a umidade, esta foi de 29,27% no pinus e de 34,04% na regeneração. No conteúdo de nitrogênio da serrapilheira, o valor observado foi de 0,98% no pinus e de 1,22% na regeneração. Observam-se ainda, mudanças na resistência a penetração que, foi de 2,98 MPa no pinus e 1,98 MPa na regeneração. O pH foi de 3,90 no pinus e de 3,72 na regeneração.

No Nitossolo também houve mudanças significativas nas propriedades do solo entre o pinus e a regeneração. Para a umidade foi observado um valor de 11,69% no pinus e 24,53% na regeneração. No diâmetro médio ponderado de agregados, observou um valor de 5,14 mm no pinus e 5,40 mm na regeneração. Para o carbono da serrapilheira, o pinus apresentou um teor de 44,62% e a regeneração de 55,88%. No carbono microbiano

o pinus apresentou 210,90 mg C g⁻¹ e a regeneração, 314,95 mg C g⁻¹. Os dados completos das propriedades edáficas avaliadas e o teste de médias para estas propriedades, entre o pinus e as áreas de regeneração, está na Tabela S3.

A análise de redes neurais da regeneração no Cambissolo, mostrou uma modularidade negativa (-1), já a densidade, foi de 0,12. Foram observados 14 nós e 11 arestas destas, 6 foram positivas e 5 negativas. No Nitossolo, a análise de redes neurais da regeneração apresentou modularidade negativa (-1,3), o diâmetro da rede neural na regeneração foi de 6 já, com a densidade foi de 0,10. Foram observados 16 nós e 12 arestas das quais, 4 foram positivas e 8 negativas (Tabela 4).

Tabela 4. Propriedades das redes neurais representativas da correlação entre a abundância da fauna e as propriedades do solo nas áreas de regeneração no Cambissolo e Nitossolo.

Propriedades da rede neural	REGEN–Cambi	REGEN–Nito
Modularidade	-1,0	-1,3
Diâmetro da rede neural	8	6
Densidade da rede neural	0,12	0,10
Número de nós	14	16
Número de arestas	11	12
Arestas positivas	6	4
Arestas negativas	5	8
Comprimento médio do caminho	3,30	2,30
Componentes conectados	3	4

Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

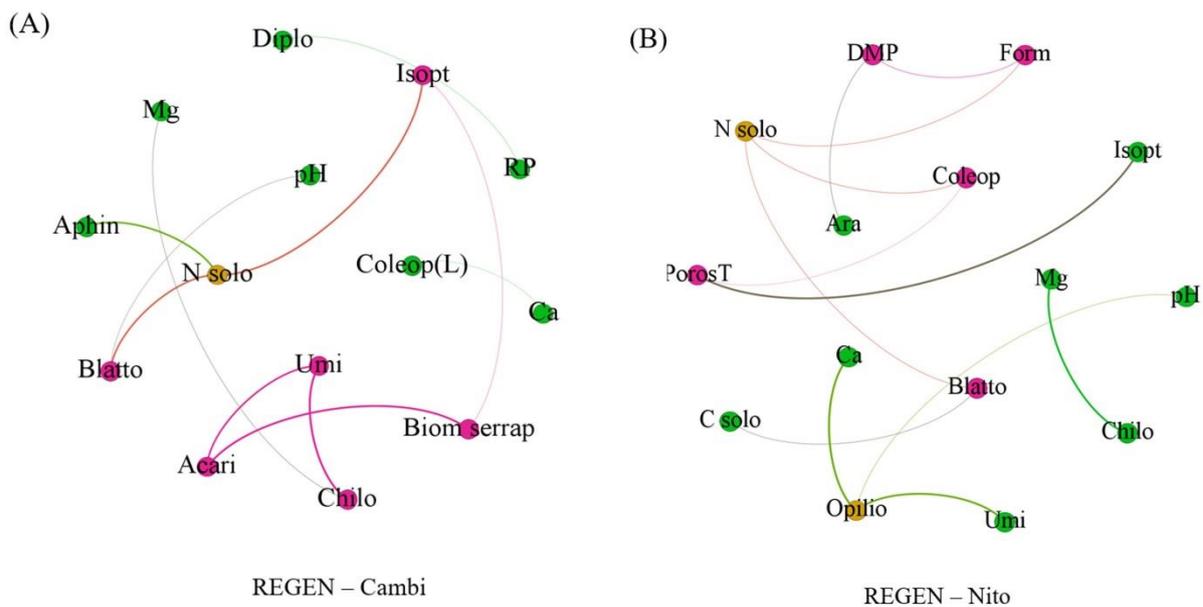
Na regeneração com Cambissolo as propriedades edáficas que estabeleceram maior número de interações com a fauna do solo foram o nitrogênio do solo e a umidade, com correlações positivas. Dos grupos que interagiram com mais de uma propriedade do solo estão Chilopoda correlacionado ao magnésio e umidade, Acari com a umidade e a biomassa da serrapilheira, Blattodea com o nitrogênio do solo e o pH e Isoptera com a biomassa da serrapilheira e nitrogênio do solo. As correlações com o pH e a biomassa da serrapilheira foram negativas (Figura 4A).

Na regeneração com Nitossolo as propriedades edáficas que mais interagiram com a fauna do solo foram a porosidade total, o nitrogênio do solo e o diâmetro de agregados. Os grupos que se correlacionaram com mais de uma propriedade edáfica foram Formicidae correlacionado ao diâmetro de agregados e nitrogênio do solo, Coleoptera e

a porosidade total e nitrogênio do solo, Blattodea e carbono e nitrogênio do solo, Opiliones e a umidade do solo, cálcio e pH. Destas correlações somente a correlação de Opiliones e o cálcio foi positiva, as demais foram negativas. (Figura 5A).

As correlações significativas entre a abundância dos grupos taxonômicos e as propriedades no Cambissolo e Nitossolo, estão na Tabela S4.

Figura 4. Redes neurais da abundância dos grupos taxonômicos e das propriedades do solo nas áreas de regeneração para o Cambissolo (A) e Nitossolo (B).



Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Descrição dos grupos da fauna *vide* Figura 1. Mg = magnésio, Ca = cálcio, RP = resistência a penetração, Umi = umidade, Biom serrap = biomassa da serrapilheira, N solo = nitrogênio do solo, N serrap = nitrogênio da serrapilheira, Cmic= carbono microbiano, PorosT= porosidade total, C serrap = carbono da serrapilheira, DMP = diâmetro ponderado médio de agregados.

2.4 DISCUSSÃO

A regeneração com Cambissolo mostrou-se diferente da regeneração com Nitossolo, em termos de abundância dos grupos taxonômicos e estrutura da comunidade. A regeneração com Nitossolo apresentou maior diversidade e equabilidade e ainda, menor dominância do que a regeneração com Cambissolo o que, indica maior complexidade na estrutura da comunidade edáfica. As diferenças observadas entre a regeneração com Cambissolo e Nitossolo tem conexão com processos de recuperação da fauna edáfica, após a retirada do pinus. Nesse sentido, cada tipo de solo, demonstrou processos de recuperação da fauna edáfica no período pós-colheita de pinus, mas com dinâmicas

próprias em termos de abundância, estrutura da comunidade, ganhos de serviços ecossistêmicos e correlações com as propriedades do solo. Estes resultados suportam a hipótese de que, a recuperação da fauna edáfica é diferente para cada tipo de solo, mas, 4 anos após a retirada do pinus, os processos de recuperação está andamento tanto na regeneração com Cambissolo quanto na regeneração com Nitossolo.

Em termos de estrutura da comunidade a redução na abundância relativa de Formicidae entre o pinus e a regeneração foi maior no Nitossolo do que no Cambissolo. Este processo de maior redução no Nitossolo, pode ter influenciado a menor dominância no Nitossolo e as diferenças na diversidade e equabilidade entre a regeneração com Cambissolo e Nitossolo. O grupo Formicidae tende a ser um grupo dominante em áreas alteradas, competindo por recursos e levando a redução na abundância de outros grupos da fauna do solo (VICENTE et al., 2010). No início dos processos de regeneração de áreas pós-colheita de pinus é esperada uma elevada abundância de Formicidae caracterizada por espécies colonizadoras e resistentes as alterações no solo. Com a recuperação do solo, a abundância do grupo tende a reduzir, pela seleção de espécies dependentes de condições mais favoráveis em termos de vegetação e habitat (TÄUŞAN et al. 2017). Portanto, este processo de seleção de espécies e a redução da dominância de Formicidae, pode estar ocorrendo de forma mais efetiva na regeneração com Nitossolo do que na regeneração com Cambissolo, afetando toda a estrutura de comunidade da fauna do solo nesta área.

O grupo Formicidae na regeneração com Nitossolo, correlacionou-se negativamente com o nitrogênio do solo e com o diâmetro ponderado médio de agregados. Entre o pinus e a regeneração, não houve diferenças significativas para o nitrogênio do solo, apenas para o diâmetro de agregados.

As correlações com o nitrogênio, estão ligadas aos processos de decomposição da matéria orgânica com conseqüente liberação deste nutriente, as formigas participam dos processos de liberação de nutrientes como o nitrogênio, pois são consumidoras primárias que influenciam na ciclagem de nutrientes (LAVELLE, 1997; PENG et al., 2019; MOREIRA et al., 2013). Embora não haja diferenças significativas com relação ao nitrogênio do solo, houve redução da quantidade deste elemento entre o pinus e a regeneração no Nitossolo, o que pode ter influência negativa sobre a abundância de Formicidae.

Entre o pinus e a regeneração no Nitossolo, observou-se um maior aumento na abundância relativa de Collembola do que no Cambissolo. O que pode determinar a abundância do grupo Collembola em áreas em regeneração, é a presença de serrapilheira (cobertura do solo) e a disponibilidade de alimento (NIELSEN, 2019).

Entre o pinus e a regeneração com Nitossolo, houve mudanças no carbono da serrapilheira e no carbono microbiano (Tabela S3) que, apesar de não terem correlação direta com Collembola (Tabela S4), podem ter afetado indiretamente o aumento na abundância deste grupo na regeneração com Nitossolo. Isto porque, o grupo Collembola tem como fontes alimentares preferenciais a vegetação em decomposição e a biomassa de microrganismos do solo (CHRISTIANSEN et al., 2009). Portanto, a qualidade e oferta destes recursos alimentares, podem influenciar abundância de Collembola.

No que tange o ressurgimento de grupos nas áreas de regeneração natural, foi observado na regeneração com Cambissolo o ressurgimento dos grupos Isopoda e Diptera (Larva) (transformadores da serrapilheira), Dermaptera e Shympyla (predadores) que, estavam presentes na regeneração, mas não foram encontrados no pinus. No Nitossolo, estes mesmos grupos, não foram observados no pinus e também não foram observados, na regeneração. Na regeneração com Nitossolo, houve o ressurgimento de grupos como Diplopoda (transformador da serrapilheira), Opiliones, Chilopoda (predadores) além de, Oligochaeta e Isoptera (engenheiros do ecossistema), ou seja, foram encontrados na regeneração, mas, não estavam presentes no pinus.

O ressurgimento destes grupos representa ganhos em termos de funções no solo, os transformadores da serrapilheira podem auxiliar no incremento da digestão de compostos orgânicos mais complexos já a recolonização de grupos predadores, aumenta as relações intertróficas e complexidade da estrutura da comunidade, além de fazer a regulação dos grupos edáficos (LAVELLE, 1997; TULANDE-M et al., 2018). Observa-se como diferencial da regeneração com Nitossolo, os ganhos em termos de engenheiros do ecossistema que, contribuem para a formação de estruturas físicas no solo a médio e longo prazo (LAVELLE, 1997).

Tanto no Cambissolo como no Nitossolo, observam-se mudanças significativas nas propriedades edáficas entre o pinus e a regeneração que tiveram efeitos sobre os grupos da fauna do solo nas áreas de regeneração. No Cambissolo, o aumento na umidade entre o pinus e regeneração teve efeito positivo sobre Chilopoda. No Nitossolo, o grupo Opiliones, foi afetado positivamente pela maior umidade na regeneração com relação ao pinus. O grupo Opiliones também foi afetado positivamente pela redução na quantidade

de cálcio entre o pinus e a regeneração o que, pode ser um efeito indireto sobre o grupo já que, o cálcio é dos elementos importantes para a formação do seu exoesqueleto (KOVOOR, 1978).

Nota-se que independentemente do tipo de solo, o aumento na umidade teve efeito positivo sobre os grupos de predadores. A umidade é um dos fatores primordiais para a regulação metabólica nos indivíduos da fauna do solo e tem influência sobre a distribuição espacial e atividade dos organismos (LAVELLE e SPAIN, 2001).

A redução na resistência a penetração entre o pinus e a regeneração no Cambissolo teve efeito negativo sobre Diplopoda. No Nitossolo, o aumento no diâmetro ponderado médio de agregados entre o pinus e a regeneração, teve efeito negativo sobre Araneae e Formicidae.

As mudanças nas propriedades físicas entre o pinus e a regeneração nos dois tipos de solo podem ser positivas já que, a redução na resistência a penetração, indica menor compactação e o aumento no tamanho de agregados, indica maior agregação solo (ARAÚJO et al., 2010, PEREIRA e THOMAZ, 2014). Mesmo com estas mudanças nas propriedades físicas solo, as correlações com os grupos da fauna do solo foram negativas o que pode indicar que, a recuperação na física do solo nas áreas de regeneração, ainda se encontra em processo inicial e por isso, não favorece o estabelecimento dos organismos edáficos.

A alteração na estrutura física do solo é consequência da colheita do pinus e afeta os grupos da fauna que passam a maior parte do seu ciclo de vida no solo (TULANDE-M et al., 2018). As alterações na física do solo podem ser persistentes já que, a degradação e perda de estrutura física do solo é um dos primeiros efeitos dos processos de degradação do solo, mas que, em contrapartida é das últimas propriedades do solo a serem recuperadas (LAL, 2015; BRADSHAW, 1992, 1997).

2.5 CONCLUSÃO

As mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo e os ganhos em termos de ressurgimento de grupos ligados aos serviços de transformação da serrapilheira e predação, ocorreram nos dois tipos de solo. No entanto, o Nitossolo tem uma dinâmica diferente do Cambissolo para as mudanças na abundância dos grupos Formicidae e

Collembola entre o pinus e a regeneração. A regeneração com Nitossolo também se destaca pelo ressurgimento de grupos de engenheiros do ecossistema.

Na regeneração com Cambissolo e Nitossolo, a umidade do solo teve efeito positivo sobre os grupos predadores. A quantidade de cálcio teve efeito positivo sobre Opiliones no Cambissolo. As propriedades físicas de resistência a penetração, na regeneração com Cambissolo e diâmetro ponderado médio de agregados, na regeneração com Nitossolo, tiveram efeito negativo sobre Diplopoda (Cambissolo), Araneae e Formicidae (Nitossolo).

Embora a recuperação da fauna do solo ocorra forma diferente, ela já está ocorrendo, 4 anos após a retirada do pinus em qualquer tipo de solo.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M.; GORLEY, R. N.; CLARKE, K. R. **PERMANOVA + for PRIMER user manual**. v. 1, p. 1-218, 2008.
- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I; **Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods**. C·A·B International, 1993.
- ARAÚJO, A. O.; MENDOÇA, L.A.R.; FEITOSA, J.V.; ROMÃO, M.R.O.; ARAÚJO, S. A. M.; SIMPLÍCIO, A.A.F. Avaliação da Resistência a Penetração de Solos Submetidos a Manejo Florestal de Vegetação Nativa na Chapada do Araripe. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, São Luís, MA, 2010.
- BARETTA, D. et al. Fauna edáfica e sua relação com variáveis ambientais em sistemas de manejo do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 5, p. 871–879, 2014.
- BASTIAN, M.; HEYMAN, S.; JACOMY, M. Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. **ICWSM**, v. 8, p. 361-362, 2009.
- BRADSHAW, A. Restoration of mined lands – using natural processes. **Ecological Engineering**, v. 8, p. 255-269, 1997.
- BRADSHAW, A.D. The biology of land restoration. In: JAIN, S.K.; BOTSFORD, L.W. (Eds.). **Applied Population Biology**, Kluwer, Dordrecht, p. 25-44, 1992.
- BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G; FERREIRA, S.A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G.A.; PASINI, A.; BARTZ, L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M., GARCIA, J.R., OLIVEIRA E.B., BROWN, G.G, PRADO, RB. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- CARVER, S.; MIKKELSEN, N.; WOODWARD, J. Long-term rates of mass wasting in Mesters Vig, northeast Greenland: Notes on a re-survey. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 13, n. 3, p. 243–249, 2002.
- CHRISTIANSEN, K. A.; BELLINGER, P.; JANSSENS, F. Collembola: (Springtails, Snow Fleas). In: RESH, V.H.; CARDÉ, R.T. **Encyclopedia of Insects**. 2 ed. Academic Press, 2009.
- CORREIA, M. E. F. Relações entre a diversidade da fauna de solo e o processo de decomposição e seus reflexos sobre a estabilidade dos ecossistemas. **Embrapa Agrobiologia**, documentos n. 156, dez. 2002.
- CORREIA, M. E. F.; OLIVEIRA, L. C. M. Importância da Fauna de Solo para a Ciclagem de Nutrientes. In: Aquino, A. M.; Assis. R. L. **Processos Biológicos no Sistema Solo-Planta: Ferramentas para uma Agricultura Sustentável**. 1ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

DOBNER JR, M.; QUADROS, D. S. Economic Performance of Loblolly Pine Stands in Southern Brazil as A Result of Different Crown Thinning Intensities. **Revista Árvore**, v. 42, n.2, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882019000200004>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Adaptação da paisagem rural**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigoflorestal/regeneracao-natural-sem-manejo>> Acesso em: jun. 2022.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Conheça SC/ Municípios – Lages**. 2019a. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/conhecasc/municipios-de-sc/lages>>. Acesso em jun.2022.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Conheça SC/ Municípios – Bocaina do Sul**. 2019b. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/conhecasc/municipios-de-sc/bocaina-do-sul>>. Acesso em jun.2022.

HAMMER, Ø. et al. **Past**: Paleontological Statistics Software Package For Education And Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, 2001.

JUÁREZ-AGIS, A. CASTRO, N.D.H.; PÉREZ, J.L.M.; UMAÑA, M.R. Diversidad y estructura de la selva mediana subperennifolia de Acapulco, Gro., México. **Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias**, v. 5, n. 10, dez., 2016.

KAMCZY, J.; DYDERSKI, M.D.; HORODECKI, P.; JAGODZINSKI, A. M. Mite Communities (Acari, Mesostigmata) in the Initially Decomposed ‘Litter Islands’ of 11 Tree Species in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Forest. **Forests**, v .10, n. 403; **2019**. <http://dx.doi.org/10.3390/f10050403>.

KOVOOR, J. Natural Calcification of the Prosomatic Endosternite in the Phalangiidae (Arachnida: Opiliones). **Calcified Tissue Research**, n. 26, p. 267-269, 1978.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, n. 7, p. 5875-5895, 2015. doi:10.3390/su7055875.

LAVELLE, P. Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies That Determine Ecosystem Function. **Advances in Ecological Research**, v. 21, 1997.

LAVELLE, P.; MOREIRA, F.; SPAIN, A. Biodiversity: Conserving Biodiversity in Agroecosystems. In: Van Alfen, N. K. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, p. 41–60, Academic Press, 2014.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. **Soil ecology**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2001. 654p.

LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; PÉRTILE, P. **Métodos de Análises Físicas do Solo**. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV. Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Recursos Naturais, 2010.

MOREIRA, F.M.S.; CARES, J.E.; ZANETTI, R.; STURMER, S.L. **O ecossistema solo**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 352 p.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; Simioni, F. J.; Oliveira, E. B. Importância e Desempenho das Florestas Plantadas no Contexto do Agronegócio Brasileiro. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 85 - 94, jan. / mar. 2017.

MURRAY, B. R.; BAKER, A. C.; ROBSON, T. C. Impacts of the Replacement of Native Woodland with Exotic Pine Plantations on Leaf-Litter Invertebrate Assemblages: A Test of a Novel Framework. **International Journal of Ecology**, Article ID 490395, 2009. <http://dx.doi.org/10.1155/2009/490395>

NIELSEN, U. N. Soil Fauna Assemblage Succession and Restoration. **Soil Fauna Assemblages**, p. 246–267, 2019.

ORTIZ, D.C.; SOUZA, T.A.F.; PECH, T.M.; BARTZ, M.L.C.; BARETTA, D.; SIMINSKI, A.; NIEMEYER, J.C. Soil ecosystem changes by vegetation on oldfield sites over five decades in the Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Forestry Research**, v.33, p.667-677, 2022.

PECH, T. M.; FOCKINK, G. D.; SIMINSKI, A.; NIEMEYER, J. C. Role of soil fauna to litter decomposition in pine stands under Atlantic Forest biome. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1849-1866, oct./dez., 2021. <https://doi.org/10.5902/1980509852839>

PENG, Y.; YANG, W.; YUE1, K.; TAN, B.; WU, F. Impacts of soil fauna on nitrogen and phosphorus release during litter decomposition were differently controlled by plant species and ecosystem type. **Journal of Forestry Research**, v. 30, n. 3, p. 921-930, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0664-z>

PEREIRA, A. A.; THOMAZ, E. L. Estabilidade de Agregados em Diferentes Sistemas de Uso e Manejo no Município de Reserva-PR. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 2, p. 378-387, 2014.

POMPEO, P. N.; SANTOS, M. A. B.; BIASI, J. P.; SIQUEIRA, S. F.; ROSA, M. G., MALUCHE-BARETTA, C. R. D.; BARETTA, D. Fauna e sua relação com atributos edáficos em Lages, Santa Catarina – Brasil. **Revista Scientia Agraria**, v. 17, n. 1, jan./mar., p. 42-51., 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF) - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas Plantadas**. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas/405-as-florestas-plantadas>>. Acesso em: jun. 2022.

SITHOLE, H.; TANTSI, N. Ants as Indicators of Terrestrial Ecosystem Rehabilitation Processes. RANZ, R.E.R. In: **Arthropods**. Intechopen, 2021.

SOUZA, M. A.; ARAUJO, K. D.; SANTOS, E. M. C.; ALVES, G. S.; COSTA, J. G. Sazonalidade da mesofauna edáfica em fragmentos de vegetação de caatinga no semiárido nordestino do Brasil. **Revista Principia**, n. 50, 2020.

STATSOFT, INC. STATISTICA (Data analysis software system). Version 7. 2004. Disponível em:<www.statsoft.com>. Acesso em: jun.2022.

TĂUȘAN, I.; DAUBER, J.; TRICĂ, M.R.; MARKÓ, B. Succession in ant communities (Hymenoptera: Formicidae) in deciduous forest clear-cuts - an Eastern European case

study. **European Journal of Entomology**, v. 114, p. 92-100, 2017. <https://doi.org/10.14411/eje.2017.013>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995.

TULANDE-M., E. et al. Soil macrofauna in areas with different ages after *Pinus patula* clearcutting. **Universitas Scientiarum**, v. 23, n. 3, p. 383–417, 2018.

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

VICENTE, N.M.F.; CURTINHAS, J.N.; PEREZ, A.L.; PREZOTTI, L. Fauna Edáfica Auxiliando a Recuperação de Áreas Degradadas do Córrego Brejaúba, MG. **Floresta e Ambiente**, v. 17, n. 2, p .104-110, 2010.

WILLIAMS, M. I.; FARR, C. L.; PAGE-DUMROESE, D. S.; CONNOLLY, S. J.; PADLEY, E. Soil Management and Restoration. In: **Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions**. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2>

YARWOOD, S. A.; BACH, E. M.; BUSSE, M.; SMITH, J. E.; A. C. JR MAC.; CHANG, C.; CHOWDHURY, T. R. ROY, T.; WARREN, S.D. Forest and Rangeland Soil Biodiversity. In: POUYAT, R. V.; PAGE-DUMROESE, D. S.; PATEL-WEYNAND, T.; GEISER, L. H. **Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions**. Springer, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2>

MATERIAL SUPLEMENTAR

Figura S1. Transectos com pontos de amostragem nas áreas de recuperação - REGEN e pinus adjacente - PINUS.



Tabela S1. Abundância total de indivíduos por grupo taxonômico e abundância e riqueza total da fauna do solo coletada em cada área estudada.

Grupos	REGEN–Cambi	PINUS–Cambi	REGEN–Nito	PINUS–Nito
Acari	44	11	55	23
Aphinidae	15	1	0	2
Araneae	63	51	35	18
Blattodea	2	8	3	2
Chilopoda	10	7	2	0
Collembola	244	56	575	244
Coleoptera	119	110	25	2
Coleoptera (larva)	54	3	15	6
Dermaptera	3	0	0	0
Diplopoda	4	1	1	0
Diptera (larva)	2	0	0	0
Formicidae	1651	1470	558	502
Gastropoda	3	1	0	0
Hemiptera	7	5	1	3
Isopoda	3	0	0	0
Isoptera	23	47	80	0
Não identificados	14	6	12	4
Oligochaeta	3	1	5	0
Opiliones	2	3	2	0
Orthoptera	2	9	6	6
Pseudoescorpiones	0	0	0	0
Symphyla	1	0	0	0
Abundância total	2.269	1.790	1.375	812
Riqueza total	20	16	14	10

Descrição das áreas vide Tabela 1.

Tabela S2. Abundância relativa (AR%) dos grupos taxonômicos da fauna do solo coletada em cada área estudada.

Grupos	REGEN–Cambi	PINUS–Cambi	REGEN–Nito	PINUS–Nito
Isopoda	0,13	0,00	0,00	0,00
Dermaptera	0,13	0,00	0,00	0,00
Pseudoescorpiones	0,00	0,00	0,00	0,00
Opiliones	0,09	0,17	0,15	0,00
Gastropoda	0,13	0,06	0,00	0,00
Symphyla	0,04	0,00	0,00	0,00
Oligochaeta	0,13	0,06	0,36	0,00
Hemiptera	0,31	0,28	0,07	0,37
Chilopoda	0,44	0,39	0,15	0,00
Não identificados	0,62	0,34	0,87	0,49
Diplopoda	0,18	0,06	0,07	0,00
Aphinidae	0,66	0,06	0,00	0,25
Blattodea	0,09	0,45	0,22	0,25
Orthoptera	0,09	0,50	0,44	0,74
Araneae	2,78	2,85	2,55	2,22
Isoptera	1,01	2,63	5,82	0,00
Coleoptera (Larva)	2,38	0,17	1,09	0,74
Diptera (Larva)	0,09	0,00	0,00	0,00
Coleoptera	5,24	6,15	1,82	0,25
Acari	1,94	0,61	4,00	2,83
Colembola	10,75	3,13	41,82	30,05
Formicidae	72,76	82,12	40,58	61,82
Total	100	100	100	100

Descrição das áreas vide Tabela 1.

Tabela S3. Teste de médias para as propriedades químicas e físicas do Cambissolo e Nitossolo nas áreas de regeneração e de pinus adjacente.

Propriedades edáficas	REGEN– Cambi	PINUS– Cambi	REGEN– Nito	PINUS– Nito
Umidade (%)	34,04	29,27*	24,53	11,69*
Diâmetro médio ponderado de agregados (mm)	6,16	6,15	5,40	5,14*
Resistência a penetração (MPa)	1,98	2,98*	0,89	1,08
Porosidade total (m m ⁻³)	0,50	0,49	0,49	0,45
C solo (%)	6,86	8,31	4,78	2,85
N solo (%)	0,35	0,52	0,19	0,22
C serrapilheira (%)	47,96	47,01	55,88	44,62*
N serrapilheira (%)	1,22	0,98*	0,72	0,60
Biomassa da serrapilheira (kg m ⁻²)	0,98	0,93	0,94	0,50
C microbiano (mg C g ⁻¹)	249,85	245,42	314,95	210,90*
pH	3,72	3,90*	3,95	4,14
Ca (cmol dm ⁻³)	0,19	0,46	0,69	1,15*
Mg (cmol dm ⁻³)	0,35	0,43	0,14	0,18

Descrição das áreas *vide* Tabela 1. *= diferenças significativas entre as áreas pelo teste de Kruskal-Wallis (p ≤ 0,05).

Tabela S4. Correlações de Spearman entre abundância da fauna e das propriedades do solo na regeneração com Cambissolo e Nitossolo.

REGEN–Cambi				REGEN–Nito			
Grupos	Propriedades	rho	p-value	Grupos	Propriedades	rho	p-value
Chilo	Umi	0,71	0	Coleop	PorosT	-0,66	0,00*
Acari	Biom serrap	0,66	0	Opilio	pH	-0,55	0,01
Coleop(L)	Ca	-0,64	0	Opilio	Ca	0,54	0,02
Diplo	RP	-0,59	0,01	Blatto	C solo	-0,53	0,02
Isopt	Biom serrap	-0,56	0,02	Ara	DMP	-0,5	0,03
Isopt	N solo	0,55	0,02	Form	DMP	-0,49	0,03
Aphin	N solo	0,53	0,02	Form	N solo	-0,49	0,03
Blatto	pH	-0,53	0,02	Blatto	N solo	-0,49	0,03
Blatto	N solo	0,48	0,04	Opilio	Umi	0,47	0,04
Chilo	Mg	-0,47	0,05	Coleop	N solo	-0,47	0,04
Acari	Umi	0,47	0,05	Isopt	PorosT	0,47	0,04
				Chilo	Mg	0,46	0,05

rho = coeficiente de Spearman, p-value significativo > 0,05. Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Descrição dos grupos da fauna *vide* Figura 1. Descrição das propriedades edáficas *vide* Figura 4.

3 CÁPITULO 2: COMPOSIÇÃO E DIVERSIDADE DA FAUNA DO SOLO AO LONGO DA REGENERAÇÃO NATURAL DE MATA ATLÂNTICA PÓS-COLHEITA DE PINUS

RESUMO

As fazendas florestais são formadas por um mosaico de áreas de silvicultura mescladas com áreas de vegetação natural. Em cada ciclo florestal, estas fazendas sofrem ajustes nos talhões de plantios, bem como, adequações em áreas destinadas a vegetação nativa. Nas novas áreas destinadas a conservação, logo após a colheita do pinus, tem-se espaços desprovidos de vegetação e com alterações na estrutura da comunidade da fauna do solo. Estas áreas, ao longo do tempo e através da regeneração natural, podem recuperar a diversidade da fauna do solo e suas funções, aproximando-se da estrutura de comunidade da fauna do solo de florestas nativas. O objetivo deste estudo foi investigar como acontece o processo de restauração da comunidade edáfica ao longo do tempo em áreas pós-colheita de pinus. Foram avaliadas áreas em regeneração natural de 4 e 10 anos, cultivos de pinus adjacentes a estas áreas (representando o uso anterior) e áreas de floresta natural (referência). A meso e macrofauna do solo foi coletada através de monólitos de solo e armadilhas de queda. A avaliação dos dados da fauna foi realizada por análises multivariadas, índices de diversidade e abundância relativa, para responder as hipóteses: i) A recuperação na abundância, riqueza e diversidade da fauna edáfica e o aumento da sua complexidade em termos de grupos, pode ser observada entre os 4 e 10 anos de regeneração; (ii) Aos 10 anos, o processo de restauração da comunidade edáfica (abundância, diversidade funcional e estrutura da comunidade) alcança patamares próximos aos observado na florestas nativa; (iii) Os efeitos do pinus sobre comunidade da fauna do solo, são representados por reduções na abundância e diversidade de grupos da macro e meso fauna do solo e pela, promoção da dominância de grupos específicos, o que é revertido durante o processo de recomposição da biota do solo. O estudo mostrou que, ao longo da regeneração natural, entre os 4 e 10 anos, houve redução de grupos dominantes como Formicidae e aumento na complexidade da estrutura da comunidade com o ressurgimento de micropredadores/reguladores (Collembola e Acari), transformadores da serrapilheira (Oligochaeta, Diplopoda, Blattodea, Coleoptera (Larva), Diptera (Larva) e Coleoptera) e predadores (Pseudoscorpiones, Opiliones, Shymphylla, Orthoptera). Após 10 anos de regeneração natural, as áreas já haviam recuperado grupos

com funções ecossistêmicas importantes, mas, ainda não se encontram no patamar de abundância, diversidade funcional e estrutura da comunidade de áreas de floresta nativa.

Palavras-chave: pós-colheita de pinus, fauna do solo, restauração da floresta, biodiversidade.

ABSTRACT

Forest farms are formed by a mosaic of forestry areas mixed with natural vegetation areas. In each forestry cycle, these farms undergo adjustments in the plantation stands, as well as adjustments in areas destined for native vegetation. In new conservation areas, soon after pine harvest, there are spaces without vegetation and with changes in the soil fauna community structure. Over time and through natural regeneration, these areas can recover the diversity of soil fauna and its functions, approaching the soil fauna community structure of native forests. The aim of this study was to investigate how the process of restoration of the soil community occurs over time in areas after pine plantation. Areas in natural regeneration with 4 and 10 years, pine plantations adjacent to these areas (representing previous use) and areas of natural forest (reference) were evaluated. Soil mesofauna and macrofauna were collected through soil monoliths and pitfall traps. Fauna data were evaluated by multivariate analyses, diversity indices and relative abundance, to answer the following hypotheses: i) The recovery in abundance, richness and diversity of soil fauna and the increase in its complexity in terms of groups can be observed between 4 and 10 years of regeneration; (ii) At 10 years, the process of restoration of the soil community (abundance, functional diversity and community structure) reaches levels close to those observed in native forests; (iii) The effects of pine on soil fauna community are represented by reductions in the abundance and diversity of groups of soil macro and mesofauna and by the promotion of dominance of specific groups, which is reversed during the restoration of the soil biota. The study showed that, along the natural regeneration, between 4 and 10 years, there were reductions of dominant groups like Formicidae and increases the community structure complexity with the resurgence of micropredators/regulators (Collembola e Acari), litter transformers (Oligochaeta, Diplopoda, Blattodea, Coleoptera (Larva), Diptera (Larva) e Coleoptera) and predators

(Pseudoscorpiones, Opiliones, Shympyla, Orthoptera). After 10 years of natural regeneration, the areas have already recovered groups with important ecosystem functions, but are not yet at the level of abundance, functional diversity and community structure of native forest areas. Formicidae and Collembola groups stood out in the relative abundance of pine areas, influencing the dominance found in these areas.

Keywords: post-pine plantation, soil fauna, forest restoration, biodiversity.

3.1 INTRODUÇÃO

As fazendas florestais são sistemas eficientes de produção de madeira, formadas por extensas áreas de plantios comerciais mesclados com áreas de vegetação natural (OLIVEIRA E OLIVEIRA, 2017). Ao longo do tempo, como uma necessidade de adequação as exigências de certificação e de legislação ambiental, as fazendas florestais sofrem ajustes no layout dos talhões plantios, para regularizar as fazendas com relação ao tamanho das áreas de vegetação natural, incluindo áreas de preservação permanente e reservas legais (GROKE JUNIOR, 2016).

No Brasil, a restauração destas áreas de vegetação natural atende a necessidade de conservação da Floresta Ombrófila Mista (FOM), uma das fitofisionomias da Mata Atlântica mais ameaçadas em termos de biodiversidade, solo e recursos hídricos. A Floresta Montana, com altitudes entre 400 e 1.000 m, é uma das formações da FOM que, se encontra em alto nível de fragmentação (MARTINS et al., 2017; KERSTEN et al., 2015; FOCKINK et al., 2022, BRASIL, 2012). Esta fragmentação é decorrente de processos históricos de intensa exploração da madeira do pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*), além do desmatamento para o desenvolvimento da agricultura (FLORIANI e FERT NETO, 2011; HIGUCHI et al., 2012; HADDAD et al., 2015). Após um período intenso de exploração da madeira, o reflorestamento com espécies exóticas nas áreas desmatadas da FOM foi incentivado por instituições governamentais. A partir de então, houve a intensificação dos plantios florestais, especialmente com espécies de pinus (FLORIANI e FERT NETO, 2011).

O monocultivo do pinus altera a composição da fauna do solo. O estudo de Cifuentes-Croquevielle et al. (2020) no Chile central (clima temperado), observou a perda de biodiversidade em plantios de *Pinus radiata* em relação a áreas de vegetação natural. No pinus foi encontrada menor abundância de grupos com funções específicas, como os predadores e, maior abundância de grupos generalistas, do que nas florestas nativas da região de estudo. O estudo concluiu que estas mudanças na estrutura de comunidade, apontam para o processo de homogeneização da fauna edáfica, com risco de perdas ou redução da oferta de funções ecossistêmicas.

Nas fazendas florestais os ajustes nas áreas produtivas, visam a proteção da FOM através da criação de espaços destinados a restauração da vegetação original. Para tanto é realizada a colheita do pinus que, promove espaços desprovidos de vegetação, com deposição de restos culturais do pinus (cascas e tocos) e serrapilheira (acículas) e esse, é o cenário inicial da regeneração natural das áreas pós-colheita de pinus. Nestas áreas, as condições ambientais estão em constante mudança, com variações na temperatura e umidade do solo, perda de nutrientes, remoção parcial ou total da serrapilheira e a aceleração da decomposição da matéria orgânica. Todos estes fatores promovem estresse a fauna do solo remanescente (AMAZONAS et al., 2018; SIEBERS e KRUSE, 2019).

O estudo de Tulande-M et al. (2018) em áreas pós-colheita de pinus no leste da Colômbia (clima tropical), observou a redução na abundância e riqueza da macrofauna do solo após a retirada recente de plantios de *Pinus patula*. Estes autores destacaram a dominância de grupos, como os de saprófagos especializados, capazes de digerir a lignina dos restos culturais do pinus, com efeitos sobre a diversidade e equabilidade da comunidade edáfica nestas áreas.

A recomposição natural de espécies vegetais nas áreas pós-colheita de pinus, principalmente de gramíneas, por sua vez, melhora as condições para os organismos do solo, pelo aumento da biomassa vegetal e oferta de serrapilheira. Segundo Tulande-M et al. (2018) na Colômbia, a tendência é que entre 2,5 e 5 anos após a retirada do pinus, as áreas já tenham uma estrutura de comunidade da fauna do solo diferente daquela observada logo após a retirada do pinus, com maior abundância e diversidade de grupos de detritívoros e saprófagos (transformadores da serrapilheira).

Ao longo do desenvolvimento da mata secundária, a complexidade das áreas aumenta em termos de composição da vegetação e da serrapilheira com efeitos sobre a biota do solo. Quanto maior o tempo de regeneração natural, é esperado que as áreas

apresentem características de composição da comunidade da fauna edáfica similares as florestas naturais (AMAZONAS et al., 2018).

A importância da fauna do solo e das mudanças que ocorrem na sua estrutura da comunidade, ao longo dos processos de restauração de áreas alteradas, está nas funções que estes organismos executam no solo. A fauna do solo é responsável pela degradação e redistribuição da serrapilheira o que, influencia a ciclagem de nutrientes, também auxilia no fluxo de água no solo, na aeração, estruturação e umidade do solo, garantindo a qualidade física. Além disso, realiza a predação de organismos edáficos o que, contribui para a regulação biológica, a sustentabilidade da cadeia trófica do solo e para conservação biodiversidade do solo (FRANCO et al., 2016; BACH et al., 2020; SANKOVITZ et al., 2018).

Até o presente momento, a maioria dos estudos envolvendo processos de recuperação de áreas pós-colheita florestal são voltados para o que acontece acima do solo, especialmente na sucessão ecológica da vegetação (FOCKINK et al., 2022; STEDILLE et al., 2018a, STEDILLE et al., 2018b). Para avaliação do sucesso dos processos relacionados a restauração de áreas pós-colheita de pinus é preciso considerar aspectos que englobem todos os componentes do ecossistema, incluindo o restabelecimento da comunidade edáfica e de suas funções ecossistêmicas. Espera-se que a regeneração natural das áreas pós-colheita de pinus inclua, além da revegetação natural, a recuperação da diversidade e da complexidade da comunidade da fauna do solo, tão necessária para manutenção dos serviços ecossistêmicos ofertados pela biota do solo.

Neste sentido, o objetivo deste estudo foi investigar como acontece o processo de restauração da comunidade edáfica ao longo do tempo em áreas pós-colheita de pinus de floresta Montana, verificando se realmente há melhorias na composição da fauna edáfica e em que ritmo e condições acontecem a recomposição da diversidade, em comparação a diversidade em plantios de pinus e florestas naturais. Para isso foram estudadas áreas pós-colheita de pinus com 4 e 10 anos de regeneração natural, tendo como referência áreas adjacentes de plantios de pinus (representando o uso anterior) e áreas de floresta natural. As seguintes hipóteses foram testadas: i) A recuperação na abundância, riqueza e diversidade da fauna edáfica e o aumento da sua complexidade em termos de grupos, pode ser observada entre os 4 e 10 anos de regeneração; (ii) Aos 10 anos de regeneração, o processo de restauração da comunidade edáfica (abundância, diversidade funcional e estrutura da comunidade) alcança patamares próximos aos observado na floresta nativa; (iii) Os efeitos do pinus a comunidade da fauna do solo, são representados por reduções

na abundância e diversidade de grupos da macro e meso fauna do solo e pela, promoção da dominância de grupos específicos, o que é revertido durante o processo de recomposição da biota do solo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Local de estudo

O estudo foi realizado no município de Bocaina do Sul, no planalto sul de Santa Catarina, Brasil em uma fazenda florestal (27°44'04.7" S; 49°59'36.7"O) pertencente a Klabin S.A. A região onde encontra-se a fazenda é formada por campos nativos e remanescentes de Mata Atlântica, especificamente da FOM do tipo Montana, localizada em altitude de 860 m. O clima da região é mesotérmico úmido (Cfb) pela classificação Köppen (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2020; CARVER et al., 2002).

Nesta fazenda foram selecionadas 3 áreas pós-colheita de pinus com 4 e 10 anos de regeneração natural em Áreas de Preservação Permanente (APPs), 3 áreas adjacentes com plantio de pinus com 3 e 9 anos (áreas de plantio comercial) e ainda, 3 áreas de floresta natural secundária, totalizando 6 tratamentos e 15 unidades amostrais. A classe de solo predominante nestas áreas é o Cambissolo húmico alumínico. O histórico de uso do solo e caracterização detalhada das unidades amostrais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de uso do solo e caracterização das áreas de estudo.

Unidade amostral	Histórico e caracterização
4 anos de regeneração REGEN – 4	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> até 2015. Áreas de preservação permanente (APP's) com regeneração natural com 4 anos, em processo inicial de revegetação secundária (arbustos, ervas e gramíneas). Solo recoberto por gramíneas, com alguns vestígios de deposição de restos culturais da colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
10 anos de regeneração REGEN – 10	Áreas com <i>P. taeda</i> até 2009. Área de APP com regeneração natural (APP) com 10 anos, em processo de revegetação mais avançado em termos de tempo e desenvolvimento da vegetação secundária (além de arbustos e ervas, espécies arbóreas como <i>Mimosa scabrella</i>). Solo recoberto por gramíneas e serrapilheira da vegetação secundária, sem vestígios de restos culturais da colheita do pinus.
Plantação de pinus adjacente a REGEN – 4 PINUS – 4	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> em 3º ciclo de plantio, idade do plantio: 3 anos. Áreas com árvores de pinus de pequena estatura. Plantio com boa parte do solo descoberto mas, com, alguns vestígios de restos culturais da última colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
Plantação de pinus adjacente a REGEN – 10 PINUS – 10	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> em 2º ciclo de plantio, idade do plantio: 9 anos. Áreas com árvores de pinus de grande estatura. Plantio com o solo totalmente recoberto por acículas do pinus.
Floresta Natural FOREST	Vegetação natural, floresta secundária. Sem histórico de plantio comercial. Áreas com espécies vegetais típicas da FOM montana, incluindo espécies arbóreas como <i>A. angustifolia</i> e além de plantas como <i>Dicksonia sellowiana</i> . Solo recoberto por serrapilheira destas espécies.

Em cada unidade amostral foram estabelecidos transectos com 6 pontos amostrais espaçados 30 m entre si, totalizando 18 pontos amostrais para cada tratamento (n = 18). Uma distância de 45 m foi mantida entre os transectos estabelecidos nas áreas de

regeneração e pinus (Figura S1A), nas áreas de floresta natural foi estabelecido apenas um transecto por área (Figura S1B).

3.2.2 Coleta e caracterização da fauna do solo

As amostragens para estudo da fauna edáfica foram realizadas no verão de 2019, quando a temperatura média variou entre 17 e 26 °C com precipitação média de 3,6 mm, entre os dias de coleta.

A fauna do solo foi coletada em cada ponto amostral, pelos métodos do monólito de solo e de armadilhas de queda. O método do monólito foi usado para coleta da macrofauna do solo e da serrapilheira, conforme Anderson e Ingram (1993). A armadilha de queda foi usada para a coleta da macrofauna e mesofauna da superfície do solo, conforme descrito por Baretta et al. (2014). Os organismos da fauna do solo foram identificados com base no nível taxonômico mais específico possível, com auxílio de um microscópio estereoscópico com aumento de 50 vezes. Os grupos Formicidae e Aphinidae foram classificados a nível de família, já Chilopoda, Collembola, Diplopoda, Symphyla, e Gastropoda a nível de classe e Oligochaeta como subclasse. Para os grupos Araneae, Blattodea, Coleoptera, Dermaptera, Hemiptera, Isopoda, Opiliones, Orthoptera, Diptera, Pseudoscorpiones, a classificação foi a nível de ordem e para Isoptera de subordem.

A abundância total de fauna solo e abundância por grupo taxonômico foi determinada pelo monólito de solo e armadilha de queda. Para a análise dos dados, a abundância da fauna do solo (total e para os grupos taxonômicos) do método do monólito de solo e da armadilha de queda, foi somada. A riqueza foi avaliada de forma conjunta para os dois métodos de coleta de fauna. Desse modo, se obteve a riqueza total de grupos taxonômicos (número total de grupos) e determinou-se abundância total de organismos da fauna do solo (número total de indivíduos) para cada área estudada.

Calculou-se ainda a abundância relativa dos grupos taxonômicos (AR), ou seja, a abundância percentual de cada grupo em relação a abundância total de organismos amostrados. Também foi realizado o cálculo da diferença entre a abundância relativa dos grupos da regeneração com 10 anos e 4 anos (AR dos grupos de REGEN – 10 menos AR dos grupos de REGEN – 4) e entre os 10 anos de regeneração e a floresta (AR dos grupos de REGEN – 10 menos AR dos grupos de FOREST).

Os dados de abundância e riqueza da fauna do solo foram utilizados para determinação dos índices de dominância de Simpson de Simpson (D'), diversidade de Shannon (H'), e equabilidade de Pielou (J'), calculados pelo software Past 4.03 (HAMMER et al., 2001).

3.2.3 Análise de dados

Para melhor compreensão do objetivo e das hipóteses, a seguir são descritas as comparações realizadas entre as áreas com base nos resultados de riqueza, abundância e diversidade de grupos da macro e mesofauna:

- As comparações entre os tratamentos REGEN – 4 *versus* REGEN – 10 e REGEN –10 *versus* FOREST, visam responder a duas primeiras hipóteses, relacionadas a mudanças na comunidade da fauna do solo ao longo do tempo de revegetação natural das áreas.
- As comparações entre os tratamentos REGEN – 4 *versus* PINUS – 4 e REGEN –10 *versus* PINUS–10, visam responder a terceira hipótese relacionada aos efeitos dos plantios de pinus sobre a comunidade da fauna do solo.

O objetivo destas comparações foi verificar as mudanças na fauna edáfica ao longo do tempo (4 e 10 anos) em relação a observada em áreas de floresta secundária. Os dados de abundância dos grupos taxonômicos identificados foram transformados para base logarítmica ($\log x + 1$). Após, foram submetidos a análise permutacional multivariada de variância (PERMANOVA) (utilizando o índice de Bray-Curtis da matriz de dados), a análise de Coordenadas Principais (PCoA) e análise de porcentagem de similaridade (SIMPER). Para as análises multivariadas utilizou-se o software Primer 6 & Permanova (ANDERSON et al., 2008).

O objetivo da PERMANOVA foi verificar se existem diferenças entre os tratamentos, com base nas medidas de abundância dos grupos taxonômicos (n° indivíduos por ponto amostral). Para tanto, realizou-se main and pair-wise test com o cálculo do pseudo-F e p ($p \leq 0,05$). A análise de SIMPER foi utilizada para determinar quais grupos taxonômicos mais contribuíram para a dissimilaridade entre os tratamentos. Neste caso, considerou-se apenas as contribuições maiores de 5%. A análise de PCoA foi realizada para a ordenação dos grupos taxonômicos nos diferentes tratamentos e para identificar os

grupos de maior correlação com cada tratamento/unidade amostral (correlação de Pearson $> 0,2$).

3.3 RESULTADOS

Nas áreas em regeneração de 4 e 10 anos, foi observada uma abundância total de 2.269 e 2.011 indivíduos da fauna do solo, respectivamente. Nas áreas de pinus, foi observada uma abundância total de 1.790 indivíduos nas áreas adjacentes aos 4 anos de regeneração e de 913 indivíduos nas áreas adjacentes aos 10 anos de regeneração. Na floresta natural a abundância total foi de 1.006 indivíduos.

Com relação a riqueza, foram encontrados 20 grupos taxonômicos nas áreas de regeneração de 4 e 10 anos enquanto, na floresta foram observados 17 grupos e nas áreas de pinus observou-se 16 grupos nas adjacentes aos 4 anos de regeneração e 15 grupos naquelas adjacentes aos 10 anos de regeneração.

Ao observar a diversidade e a equabilidade dos grupos taxonômicos representadas pelos índices de diversidade (H') e equabilidade (J') verificou-se que durante a regeneração os índices H' e J' foram maiores aos 10 anos do que aos 4 anos de regeneração. Já o índice de dominância de Simpson (D') foi maior aos 4 anos de regeneração (Tabela 2).

Os índices H' e J' tiveram maior valor na floresta do que na regeneração de 10 anos. No índice D' , foi observado maior valor do índice na regeneração com 10 anos, em relação a floresta (Tabela 2).

O índice H' foi maior nas áreas de regeneração do que nas áreas de pinus, esse resultado foi observado para os 4 anos de regeneração e pinus adjacente e para os 10 anos de regeneração e pinus adjacente. Para índice J' a regeneração de 4 anos apresentou maior valor do que o pinus, e a regeneração de 10 anos apresentou o mesmo índice H' que o pinus. No índice D' , observou-se que na regeneração de 4 e 10 anos houve menor valor para o índice, do que nas áreas de pinus correspondentes (Tabela 2).

Tabela 2. Índices de diversidade das áreas estudadas.

Índices	REGEN – 4	REGEN – 10	FOREST	PINUS – 4	PINUS – 10
Diversidade de Shannon H'	1,02	1,45	1,72	0,65	1,09
Equabilidade de Pielou J'	0,53	0,68	0,81	0,39	0,68
Dominância de Simpson D'	0,53	0,33	0,25	0,70	0,44

Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

A PERMANOVA revelou diferenças significativas (pseudo-F = 9,22; p = 0,001) na comunidade da fauna do solo entre as áreas estudadas, com base na abundância total de cada grupo taxonômico. O resultado do pair-wise test indicou a separação entre os tratamentos em todas as comparações realizadas, demonstrando que é significativa a diferenciação da comunidade da fauna do solo em termos de abundância dos grupos taxonômicos (Tabela 3).

Tabela 3. Análise permutacional multivariada (PERMANOVA) de variância da abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas estudadas.

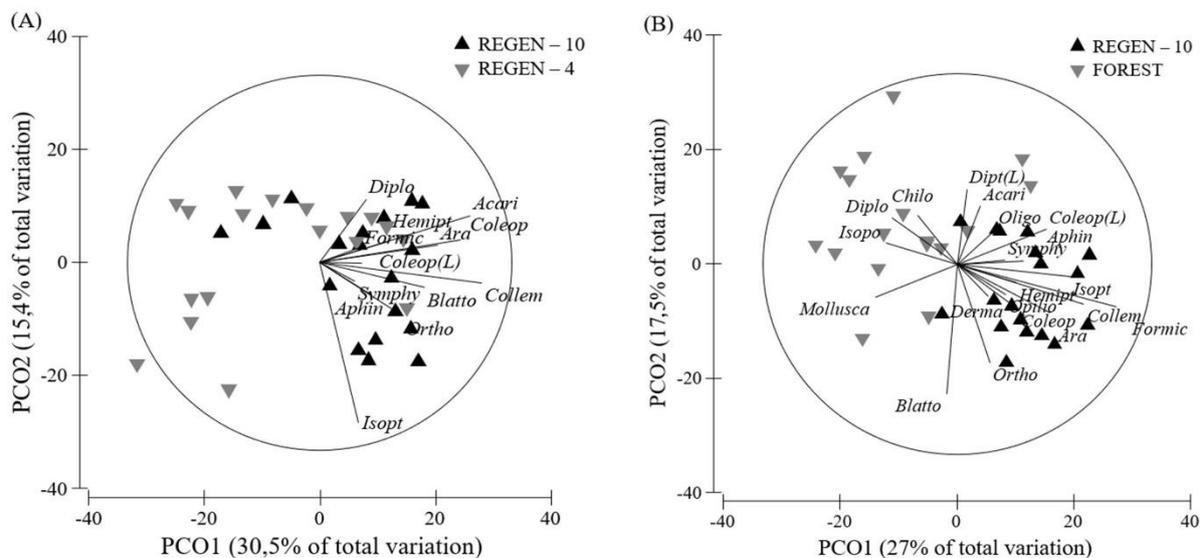
REGEN anos <i>versus</i> 10 anos			
	Pair-wise test	pseudo-F	p
REGEN – 4 <i>versus</i> REGEN – 10		2,09	0,004*
REGEN <i>versus</i> FOREST			
	Pair-wise test	pseudo-F	p
REGEN – 10 <i>versus</i> FOREST		2,80	0,001*
REGEN <i>versus</i> PINUS			
	Pair-wise test	pseudo-F	p
REGEN – 4 <i>versus</i> PINUS – 4		2,36	0,001*
REGEN – 10 <i>versus</i> . PINUS – 10		3,89	0,001*

Descrição das áreas *vide* Tabela 1, * = significativo (p < 0,05).

A análise de PCoA (Figuras 1 e 2) mostrou uma clara separação entre as áreas, confirmando os resultados da PERMANOVA. Ao longo do tempo de regeneração, a área com 10 anos apresentou maior correlação com os grupos da fauna do solo do que a área com 4 anos (Eixo 1 explica 30,5% e Eixo 2 15,4%). Os grupos Acari, Coleoptera, Collembola e Isoptera foram os que mais se correlacionaram com os 10 anos de regeneração (Figura 1A).

Verificou-se que os grupos correlacionados aos 10 anos de regeneração foram diferentes daqueles observados na floresta (Eixo 1 explica 27,0% e Eixo 2 17,5%). Os grupos de maior correlação com os 10 anos de regeneração foram Formicidae, Collembola e Blattodea e os de maior correlação com a floresta foram Gastropoda, Isopoda, Diplopoda e Chilopoda (Figura 1B).

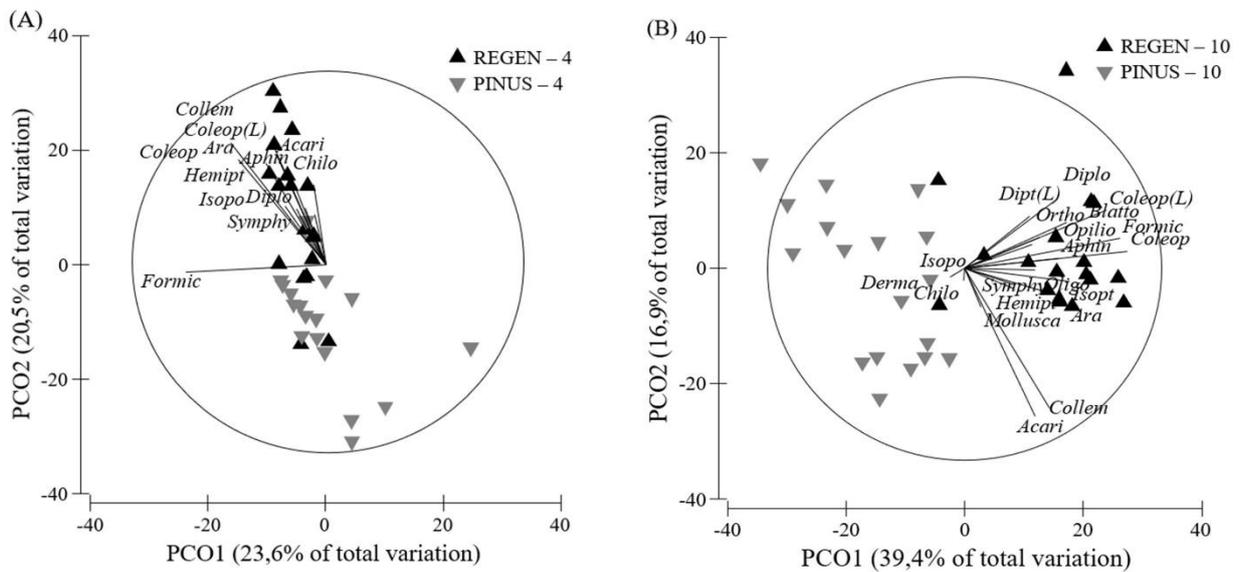
Figura 1. Ordenação (análise de Coordenadas Principais – PCoA) da abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas de regeneração e de floresta natural.



Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Aphin = Aphinidae, Ara = Araneae, Blatto = Blattodea, Chilo = Chilopoda, Coleop = Coleoptera, Coleop (L) = Coleoptera (Larva), Collem = Collembola, Derma = Dermaptera, Diplo = Diplopoda, Dipt (L) = Diptera (Larva) Formic = Formicidae, Hemipt = Hemiptera, Isopo = Isopoda, Isopt = Isoptera, Symphy = Symphyla, Oligo = Oligochaeta, Opilio = Opiliones, Ortho = Orthoptera.

Em relação as áreas adjacentes de pinus, as áreas em regeneração com 4 anos (Eixo 1 explica 23,6% e Eixo 2 20,5%) e 10 anos (Eixo 1 explica 39,4% e Eixo 2 16,9%) apresentaram maior número de grupos correlacionados do que nos plantios de pinus, indicando uma clara separação/diferença entre as áreas em termos de estrutura da comunidade (composição e abundância dos grupos). Os grupos Formicidae, Collembola, Coleoptera (Larva), Coleoptera e Araneae, correlacionaram-se em termos de abundância, com os 4 anos de regeneração (Figura 2A). Já os grupos de Collembola, Acari, Formicidae, Coleoptera e Coleoptera (Larva) correlacionaram-se, em termos de abundância, com a regeneração com 10 anos (Figura 2B).

Figura 2. Ordenação (análise de Coordenadas Principais – PCoA) da abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas de regeneração e pinus adjacente.

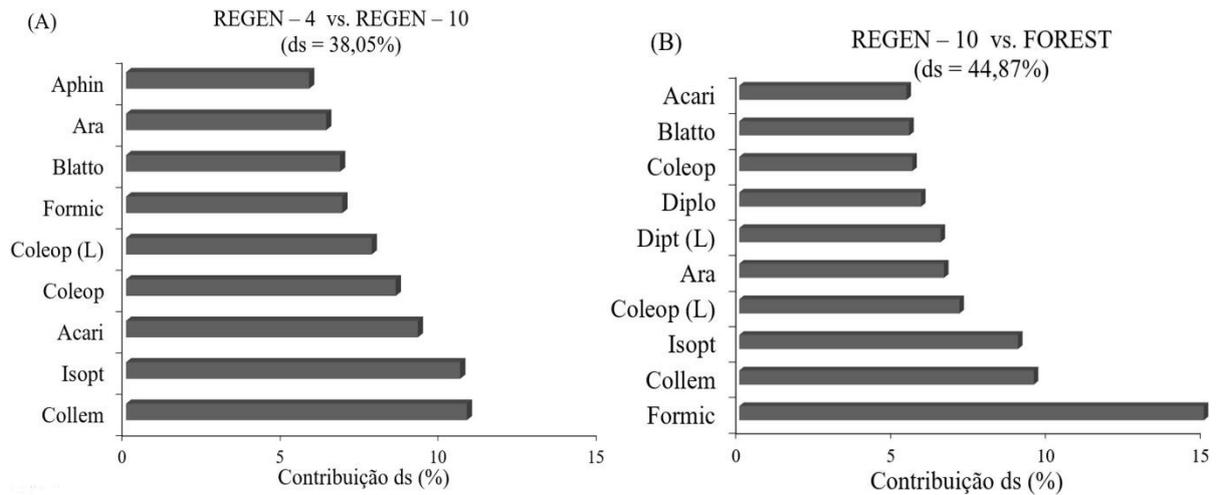


Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Descrição dos grupos taxonômicos *vide* Figura 1.

O grupo Collembola foi o grupo responsável por 10,78% da dissimilaridade entre 4 e 10 anos de regeneração já Isoptera foi responsável por 10,57%, Acari por 9,23%, Coleoptera por 8,53%, Coleoptera (Larva) por 7,77%, Formicidae por 6,84%, Blattodea por 6,77%, Araneae por 6,33% e Aphinidae por 5,79% da dissimilaridade entre as áreas (Figura 3A).

O grupo Formicidae teve o maior percentual de contribuição (15,57%) na dissimilaridade entre a regeneração com 10 anos e a floresta natural. Os demais grupos que contribuíram para a dissimilaridade foram Collembola (9,51%), Isoptera (9%), Coleoptera (Larva) (7,11%), Araneae (6,61%), Diptera (Larva) (6,50%), Diplopoda (5,87%), Coleoptera (5,59%), Blattodea (5,49%) e Acari (5,40%) (Figura 3B).

Figura 3. Percentual de contribuição dos grupos da fauna edáfica para a dissimilaridade* entre as áreas de regeneração e a floresta nativa.

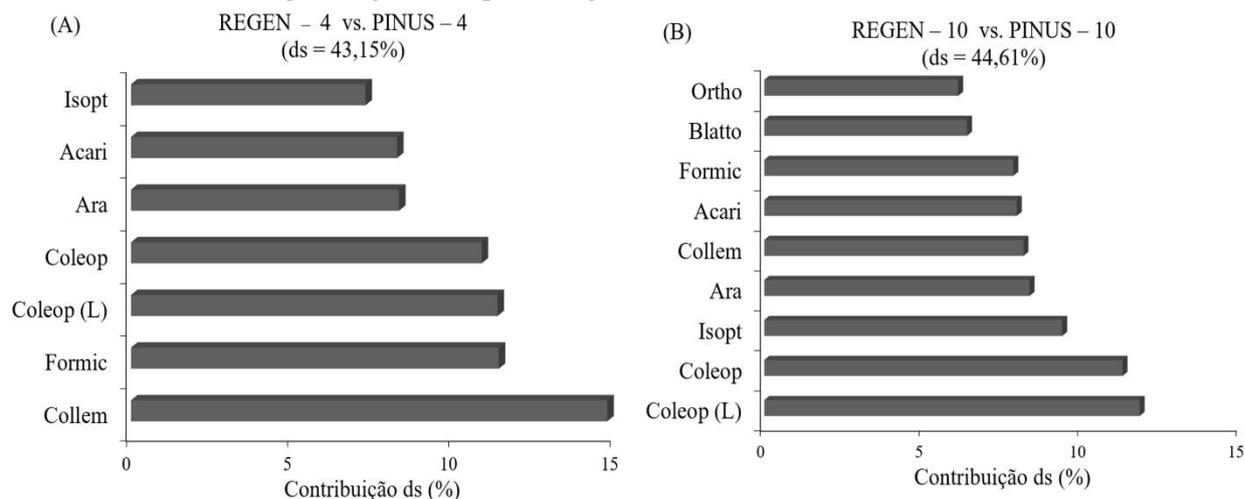


Descrição das áreas *vide* Tabela 1. ds = dissimilaridade, vs.= versus. Descrição dos grupos *vide* Figura 1.
*Determinado por análise de SIMPER.

Os principais grupos taxonômicos, cuja abundância foi responsável pelas diferenças entre os 4 anos regeneração e o pinus adjacente, foram Collembola com dissimilaridade de 14,75%, Formicidae (11,39%), Coleoptera (Larva) (11,35%), Coleoptera (10,86%), Araneae (8,30%), Acari (8,24%) e Isoptera (7,26%) (Figura 4A).

Aos 10 anos de regeneração, os grupos que indicaram diferenças do plantio de pinus foram Coleoptera (Larva) com dissimilaridade de 11,83%, Coleoptera (11,29%), Isoptera (9,39%), Araneae (8,36%), Collembola (8,17%), Acari (7,96%), Formicidae (7,85%), Blattodea (6,39%) e Orthoptera (6,11%) (Figura 4B).

Figura 4. Percentual de contribuição dos grupos da fauna edáfica para a dissimilaridade* entre as áreas de regeneração e de pinus adjacente.



Descrição das áreas *vide* Tabela 1. ds = dissimilaridade, vs.= versus. Descrição dos grupos *vide* Figura 1. *Determinado por análise de SIMPER.

Quanto a abundância relativa (AR) da fauna do solo no processo de regeneração (Figura 5A) destacaram-se os grupos Formicidae, Collembola nas áreas de regeneração de 4 e 10 anos, com AR de 72,76% e 10,75% respectivamente aos 4 anos e 34,71% e 26,75% aos 10 anos. Aos 10 anos de regeneração o grupo Isoptera (13,58%) também foi um grupo de destaque. Na floresta os principais grupos na AR foram Collembola (29,13%), Formicidae (10,54%), Acari (9,74%), Coleoptera (9,64%) e Diptera (Larva) (15,11%).

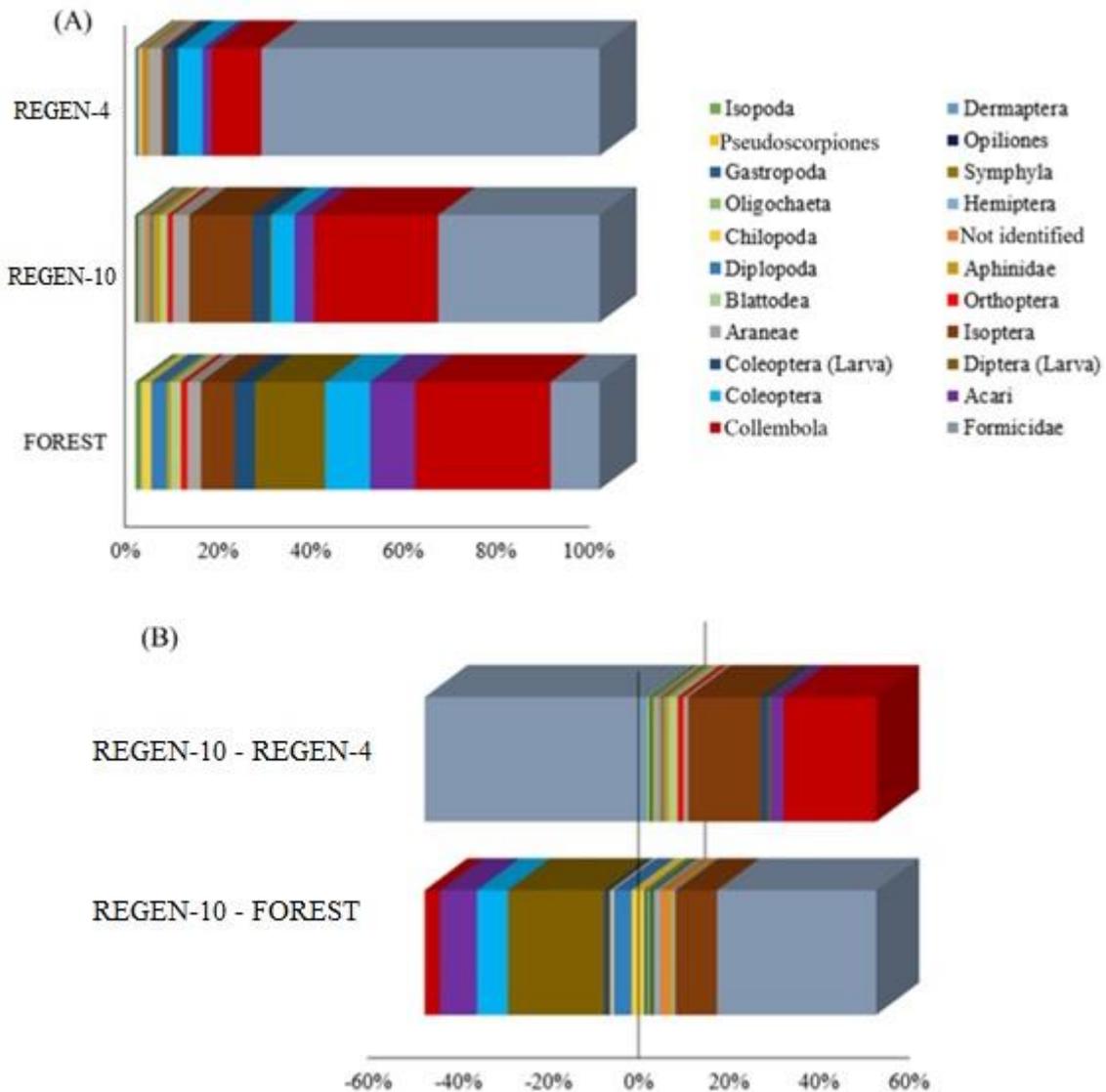
Entre os 4 e 10 anos de regeneração houve redução na AR de Formicidae em 38,05% (Figura 5B). Os grupos Isopoda, Dermaptera, Gastropoda e Chilopoda também apresentaram redução AR entre os 4 e 10 anos o que, quer dizer que aos 4 anos havia maior AR destes grupos e que houve perdas de AR ao longo do tempo de regeneração. Por outro lado, os grupos Collembola, Isoptera e Acari tiveram aumentos de 16%, 12,56% e 2,24% na AR, ao longo do tempo de regeneração, entre os 4 e 10 anos. Para os demais grupos Pseudoscorpiones, Opiliones, Shympyla, Oligochaeta, Heimiptera, Diplopoda, Aphinidae, Blattodea, Orthoptera, Araneae, Coleoptera (Larva), Diptera (Larva) e Coleoptera também se registraram aumentos na AR ao longo da regeneração.

A regeneração com 10 anos teve maior AR do que a floresta para os grupos, Formicidae e Isoptera, a diferença de AR entre as áreas para esses grupos foi de 24,17% e 6,32%, ou seja, este é o incremento de AR da área de regeneração com relação a floresta (Figura 5B). Outros grupos encontrados na regeneração com 10 anos apresentaram maior

AR nesta área em comparação com floresta: Dermaptera, Opiliones, Shympyla, Hemiptera, Aphinidae e Araneae.

Para os grupos Diptera (Larva), Acari, Coleoptera e Collembola o que se observa é que a regeneração com 10 anos, teve menor AR para estes grupos, a diferença de AR entre as áreas é de -14,61%, -5,56%, -4,67% e -2,37% ou seja, esta é a redução de AR da área de regeneração com relação a floresta (Figura B) . Outros grupos que tiveram menor AR aos 10 anos de regeneração do que na floresta foram Isopoda, Pseudoscorpiones, Gastropoda, Oligochaeta, Diplopoda, Chilopoda, Blattodea, Orthoptera e Coleoptera (Larva). Os valores de abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo, os valores de AR e de diferença na abundância relativa entre a regeneração e a floresta encontram-se nas tabelas S1, S2 e S4, respectivamente.

Figura 5. Abundância relativa (AR) em % dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas de regeneração e a floresta nativa (A) e diferenças na AR da regeneração de 4 e 10 anos e entre a regeneração de 10 anos e a floresta (B).

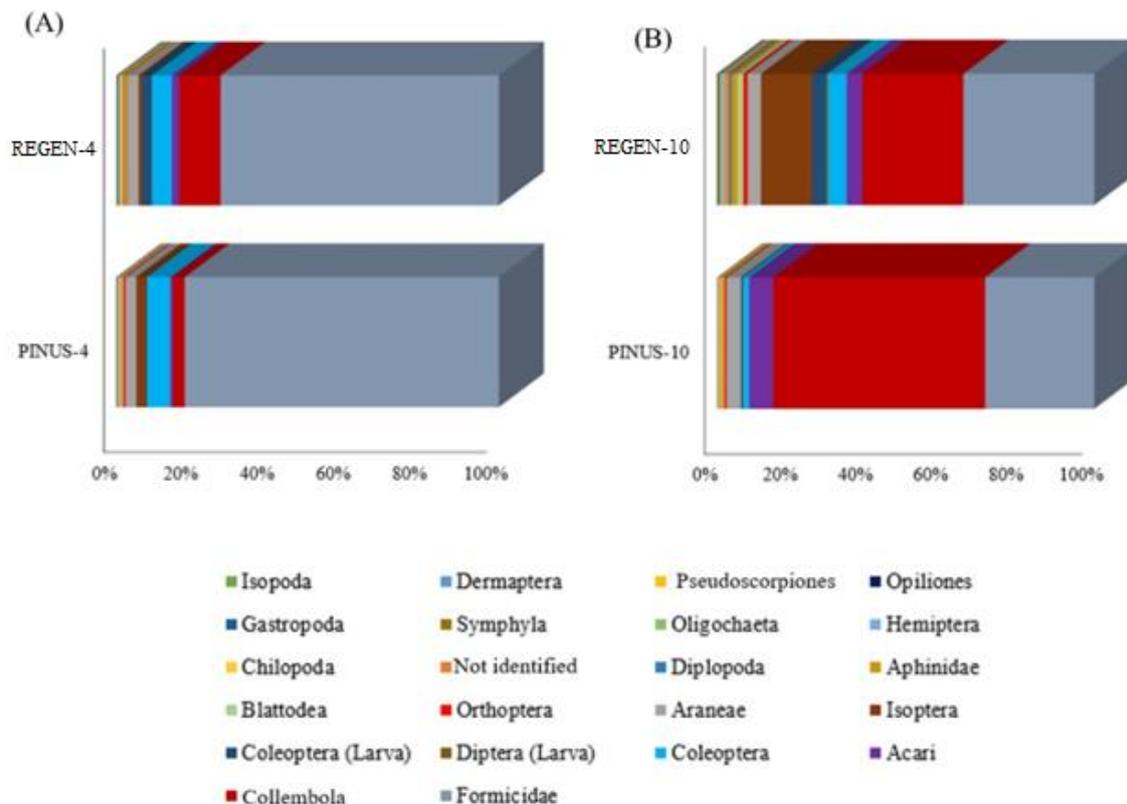


Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

Quanto a AR da fauna do solo no pinus em relação a regeneração com 4 anos, destacaram-se os grupos Formicidae, Collembola e Coleoptera tanto nas áreas de regeneração com 4 anos (AR de 72,76%, 10,75%, e 5,24% respectivamente) quanto no pinus adjacente (AR de 82,12% e 3,13% e 6,15% respectivamente) (Figura 6A).

No pinus adjacente aos 10 anos de regeneração, destacaram-se Collembola, Formicidae e Acari, com (AR de 56,19%, 28,92% e 6,35%) que na regeneração de 10 anos, tiveram AR de 26,75%, 34,71% e 4,18% respectivamente (Figura 6B).

Figura 6. Abundância relativa (AR) em % dos grupos taxonômicos da fauna do nas áreas de regeneração e de pinus adjacente.



Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

3.4 DISCUSSÃO

Ao longo do tempo de regeneração natural, entre os 4 e 10 anos após a retirada do pinus, foram observadas mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo. Os aumentos na diversidade e equabilidade da comunidade edáfica e a redução da dominância de grupos, indicam o aumento da complexidade da comunidade e a sua recuperação espontânea ao longo do tempo. Assim, confirma-se a primeira hipótese deste estudo.

Os principais grupos que determinaram diferenças entre os 4 e 10 anos de regeneração foram Collembola, Acari e Isoptera. Estes grupos apresentaram ganhos de abundância relativa ao longo do processo de regeneração natural. Por outro lado, o grupo Formicidae foi o que apresentou maior redução na abundância relativa entre os 4 e 10 anos de regeneração.

É reportado que os grupos Collembola e Acari são organismos colonizadores que se estabelecem nas áreas em restauração em função da formação da camada de serrapilheira e da disponibilidade de alimento (NIELSEN, 2019). O incremento na abundância relativa de Collembola é benéfico ao sistema em restauração pois, este grupo atua na regulação de microrganismos decompositores, consumindo principalmente fungos e bactérias. No processo de regulação microbiana, Collembola afeta indiretamente a transformação da matéria orgânica e de nutrientes (OLEJNICZAK et al., 2021). O grupo Acari também tem efeitos indiretos sobre os processos de transformação da matéria orgânica pois, se alimenta de fungos além disso, tem importância como micropredador de pequenos artrópodes, contribuindo para regulação da cadeia trófica (GROOT et al., 2016; KRANTZ e WALTER, 2009).

Com relação a abundância relativa de Isoptera, a contribuição deste grupo pode ser favorável ao processo de restauração pois, os cupins além de atuarem como engenheiros do ecossistema, influenciando na estrutura do solo, tem adaptações no seu modo de vida que permitem a degradação de madeira. Desse modo, nas áreas pós-colheita de pinus em recuperação, os cupins podem contribuir para degradação de galhos e tocos. Como uma característica funcional, grupo Isoptera também tem a capacidade de ingerir solo o que implica na redistribuição da matéria orgânica e de nutrientes no solo de forma mais efetiva (BROWN et al., 2015; WIJAS e ATAKISON et al., 2021).

Com relação ao grupo Formicidae, mudanças na estrutura da comunidade deste grupo em específico são esperadas ao longo do tempo de restauração de sistemas alterados. A tendência da estrutura de comunidade edáfica de locais que passaram pela colheita florestal, é a de apresentar espécies de Formicidae resistentes a degradação do solo, capazes de habitar espaços abertos e que incluam grupos colonizadores (TĂUȘAN et al. 2017). A resistência de Formicidae as perturbações no ambiente edáfico e a possibilidade da existência de espécies colonizadoras vindas de áreas próximas, pode ajudar a explicar a elevada abundância relativa deste grupo, no início da regeneração natural. No entanto, com o passar do tempo e mudanças no ambiente em restauração, são esperadas novas espécies que tendem a ser mais adaptadas e dependentes de vegetação densa e as condições favoráveis de temperatura e umidade do solo (TĂUȘAN et al. 2017). Assim, as mudanças no habitat, podem ter selecionado as espécies de Formicidae, reduzindo as espécies dominantes e mantendo as que se adaptaram as mudanças no

habitat, resultado em redução na abundância relativa do grupo ao longo do tempo de regeneração natural.

Ao longo da regeneração natural também foi observado o aumento na complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo, devido a recuperação de outros grupos funcionais importantes. Observou-se a recuperação da abundância de transformadores da serrapilheira (Oligochaeta, Diplopoda, Blattodea, Coleoptera (Larva), Diptera (Larva) e Coleoptera) e predadores (Pseudoscorpiones, Opiliones, Shympyla, e Orthoptera).

Com estes resultados, o presente estudo indicou que a diversidade funcional do solo pode ser recuperada, através da recuperação dos grupos da fauna edáfica, ao longo do tempo de regeneração das áreas pós-colheita de pinus. O aumento nas funções ecossistêmicas ao longo do processo de regeneração, pode ter sido favorecido pelo aumento na diversidade e equabilidade da fauna do solo.

A recuperação e aumento na diversidade de grupos transformadores da serrapilheira permite incrementar a digestão de compostos orgânicos mais complexos (LAVELLE, 1997). Além disso, o restabelecimento de transformadores da serrapilheira, estimula o aumento na diversidade e recolonização de grupos predadores, aumentando a complexidade da estrutura da comunidade (TULANDE-M et al., 2018). O processo de recolonização de transformadores da serrapilheira e predadores nas áreas pós-colheita de pinus, após 10 anos de regeneração, podem ter sido possibilitado pela redução de Formicidae, grupo que quando dominante na estrutura da comunidade, compete por recursos com outros grupos da fauna do solo (VICENTE et al., 2010).

Considerando a floresta nativa como referência, sua estrutura de comunidade da fauna do solo representa o ideal a ser alcançado pelo processo de regeneração natural das áreas pós-colheita de pinus. O que se observa ao longo do processo de regeneração com relação a floresta é que 10 anos após a retirada do pinus, as áreas já recuperaram funções ecossistêmicas importantes. Apesar disso, a contribuição dos grupos funcionais para a estrutura da comunidade da fauna do solo ainda é diferente daquela encontrada na floresta nativa. Por isso, a segunda hipótese só pode ser confirmada em parte pois, há indícios de restauração da comunidade edáfica em termos de abundância, diversidade e estrutura da comunidade, mas que ainda não alcançam patamares próximos aos observado na floresta nativa.

A regeneração com 10 anos, diferente da floresta, ainda apresenta a dominância de alguns grupos como Formicidae. A regeneração também não conseguiu recompor, a abundância de grupos como Collembola, Acari (micropredadores/reguladores), Coleoptera e Diptera (Larva) (transformadores da serrapilheira) no mesmo nível da floresta. Outros grupos com menor contribuição para a abundância na regeneração do que na floresta foram grupos de transformadores da serrapilheira (Isopoda, Gastropoda, Oligochaeta, Diplopoda, Blattodea e Coleoptera (Larva) e predadores, (Pseudoscorpiones, Chilopoda, Orthoptera).

Estes resultados apontam que, em termos funcionais a regeneração com 10 anos ainda não alcançou uma estrutura de comunidade como a da floresta. O fato de a floresta ter maior contribuição para abundância de micropredadores/reguladores, pode indicar que na floresta os processos de regulação da população microbiana e ciclagem de nutrientes estão mais equilibrados do que na regeneração. Estes grupos têm impacto significativo na dinâmica populacional de microrganismos e na liberação de nutrientes imobilizados na biomassa microbiana (LAVELLE et al., 1997).

A maior contribuição para abundância de transformadores da serrapilheira na floresta do que na regeneração, pode indicar que a floresta tem melhores recursos para estes grupos. Nas florestas naturais a maior diversidade de serrapilheira pode afetar positivamente grupos detritívoros, diretamente dependentes do material vegetal depositado no solo. Os transformadores da serrapilheira também ajudam a sustentar níveis tróficos superiores pois, são regulados por predadores de topo de cadeia o que, aumenta complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo (BARBERENA-ARIAS e AIDE, 2003; MACHADO et al., 2015). Portanto, a maior contribuição para abundância de grupos predadores como Pseudoscorpiones, Chilopoda, e Orthoptera na floresta com relação ao pinus, pode indicar que a regeneração não possui uma estrutura da comunidade tão complexa quanto a floresta natural.

A principal característica encontrada para a comunidade da fauna do solo nas áreas de pinus, estudadas como um referencial de uso anterior as áreas de regeneração, foi a concentração da abundância e riqueza em poucos grupos taxonômicos, o que indica a dominância de grupos específicos de organismos. No entanto, como já apresentado, esse processo pode ser revertido pela recomposição da diversidade da fauna do solo ao longo do tempo de regeneração, por isso, aceita-se a terceira hipótese do estudo.

Observou-se que grupo Formicidae foi dominante tanto no pinus adjacente quanto na regeneração com 4 anos. Este grupo tende a ser dominante em ambientes alterados já que, é formado por organismos resistentes as mudanças no ambiente e que vivem em castas (insetos sociais) (MOREIRA et al., 2013). Em áreas que foram alteradas pode haver a predominância de espécies de formigas generalistas e isso, leva a redução na abundância de outros grupos da fauna do solo que, competem por recursos com Formicidae (VICENTE et al., 2010).

No pinus adjacente aos 10 anos de regeneração, o grupo dominante foi Collembola, na regeneração com 10 anos apesar da destacada abundância relativa deste grupo, ele não apresentou dominância. É possível que haja alta densidade de Collembola em áreas de pinus pois, algumas espécies do grupo podem ser favorecidas por este ambiente, principalmente em função da cobertura do solo (CHANG et al., 2017). No pinus adjacente aos 10 anos regeneração, tem-se áreas de recobertas por acículas de pinus o que, propicia um ambiente com cobertura e proteção do solo. Na camada espessa de serrapilheira formada por acículas de pinus, tem-se maior retenção de umidade no solo (YANG et al., 2021). Percebe-se que o plantio de pinus tem um habitat de solo que favorece o estabelecimento principalmente de colêmbolos que vivem na superfície do solo (epígeos e hemiedáficos). Nesse sentido, é reportado que alguns colêmbolos epígeos e hemiedáficos, podem ter intensa atividade de colonização em plantios de pinus sendo, provenientes de habitats próximos como florestas naturais (KOVAC et al., 2004).

Além disso, Collembola também utiliza hifas fúngicas como fonte alimentar e as áreas de pinus são um ambiente favorável a disponibilização deste recurso (HODGE, 2014; CAMPI et al, 2015). Por estas características, plantios de pinus podem ser benéficos para o desenvolvimento de grupos como Collembola.

3.5 CONCLUSÃO

As principais mudanças na estrutura da comunidade ao longo da regeneração natural foram a redução de grupos dominantes e ainda, o aumento de grupos funcionais importantes como o dos micropredadores/reguladores, transformadores da serrapilheira e predadores.

As áreas de regeneração natural pós-colheita de pinus, após 10 anos, já recuperaram grupos com funções ecossistêmicas importantes como micropredadores/reguladores, transformadores da serrapilheira e predadores, mas, ainda não se encontram no patamar de abundância, diversidade funcional e estrutura da comunidade de áreas de floresta nativa.

Formicidae e Collembola foram grupos que se destacaram na abundância relativa das áreas de pinus e influenciaram a dominância encontrada nestas áreas com relação aos sistemas naturais.

REFERÊNCIAS

- AMAZONAS, N.T.; VIANI, R.G.A.; REGO, M.G.A.; CAMARGO, F.F., FUJIHARA, R.T., VALSECHI, O.A., Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78 n. 3, p. 449–456, 2018.
- ANDERSON, M.; GORLEY, R. N.; CLARKE, K.R. **PERMANOVA + for PRIMER user manual**. v. 1, p. 1-218, 2008.
- ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I.; **Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods**. CAB International, 1993.
- BACH, E.M.; RAMIREZ, K.S.; FRASER, T.D.; WALL, D.H. Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 1–20, 2020.
- BARBERENA-ARIAS, M.F.; AIDE, T. M. Species diversity and trophic composition of litter insects during plant secondary succession. **Caribbean Journal of Science**, v. 39, n. 2, p. 161–169, 2003.
- BARETTA, D.; BARTZ, M.L.C.; FACHINI, I.; ANSELMINI, R.; ZORTÉA, T., MALUCHE BARETTA, R.D.C. Fauna edáfica e sua relação com variáveis ambientais em sistemas de manejo do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 5, p. 871–879, 2014.
- BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G; FERREIRA, S.A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G.A.; PASINI, A.; BARTZ, L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA E.B.; BROWN, G.G.; PRADO, RB. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Lei Nº 12.651**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União: Brasília, 25 de maio de 2012.
- CAMPI, M.G.; MAUBET Y.E.; BRITOS, L. Mycorrhizal fungi associated with plantations of *Pinus taeda* L. from the National University of Asunción, Paraguay. **Mycosphere**, v. 6, n. 4., p. 486-492, 2015.
- CARVER, S.; MIKKELSEN, N.; WOODWARD, J. Long-term rates of mass wasting in Mesters Vig, northeast Greenland: Notes on a re-survey. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 13, n. 3, p. 243–249, 2002.
- CHANG, L.; WANG, B.; LIU, X.; CALLAHAM, M. A. JR.; FENG, G. E. Recovery of Collembola in *Pinus tabulaeformis* Plantations. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, p. 129–137, 2017. doi:10.1016/S1002-0160(15)60099-6
- CIFUENTES-CROQUEVIELLE, C.; STANTON, D.E.; ARMESTO, J.J. Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020.
- FLORIANI, G.S.; FERT NETO, J.A. trajetória do uso do solo por florestas na região dos campos de Lages. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 10, n. 2, p. 93-102, 2011.

FRANCO, A.L.C.; BARTZ, M.L.C.; CHERUBIN, M.R.; BARETTA, D.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.G.; WALL, D.H.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Loss of soil (macro)fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of the Total Environment**, v. 563–564, p. 160–168, 2016.

FOCKINK, G.D.; ZANGALLI, D.; OLIVEIRA, E.; LUZ, G.M.P.; SILVA, A.S.; FLORIANI, M.M.P.; NICOLETTI, M.F.; KANIESKI, M.R. Ecological indicators of passive restoration in South Brazil's Atlantic Forest areas with former *Pinus taeda* L. plantations. **Ecological Engineering**, v. 179, 2022.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Conheça SC/ Municípios – Bocaina do Sul**. 2019. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/conhecasc/municipios-de-sc/bocaina-do-sul>>. Acesso em jun.2022.

GROKE JUNIOR, P.H. Um mosaico da história. **Opiniões**, n. 44, jun.-jul., 2016.

GROOT, G.A.; JAGERS OP AKKERHUIS, G. A. J. M.; DIMMERS, W.J.; CHARRIER, X.; FABER, J.H. Biomass and Diversity of Soil Mite Functional Groups Respond to Extensification of Land Management, Potentially Affecting Soil Ecosystem Services. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, mar., 2016.

HADDAD, N.M.; BRUDVIG, L.A.; CLOBERT, J.; DAVIES, K.F.; GONZALEZ, A.; HOLT, R.D.; LOVEJOY, T.E.; SEXTON, J.O.; AUSTIN, M.P.; COLLINS, C.D.; COOK, W.M.; DAMSCHEN, E.I.; EWERS, R.M.; FOSTER, B.L.; JENKINS, C.N.; KING, A.J.; LAURANCE, W.F.; LEVEY, D.J.; MARGULES, C.R.; MELBOURNE, B.A.; NICHOLLS, A.O.; ORROCK, J.L.; SONG, D.X.; TOWNSHEND, J.R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, v. 1, n. 2, mar., 2015.

HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. **Past**: Paleontological Statistics Software Package For Education And Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, v. 4, n. 1, 2001.

HIGUCHI, P.; SILVA, A.C.; FERREIRA, T.S.; SOUZA, T.S.; GOMES, J.P.; SILVA, K.M.; SANTOS, K.F.; LINKE, C.; PAULINO, P.S. Influência de Variáveis Ambientais sobre o Padrão Estrutural e Florístico do Componente Arbóreo, em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 79-90, jan.-mar., 2012.

HODGE, A. Interactions Between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Organic Material Substrates. **Advances in Applied Microbiology**, v. 89, 2014.

KERSTEN, R. A.; BORGIO, M.; GALVÃO, F. Floresta Ombrófila Mista: aspectos fitogeográficos, ecológicos e métodos de estudo. In: EISENLOHR, P.V.; FELFILI, J.M.; MARIA MELO, M.M.R.F.; ANDRADE, L.A.; MEIRA NETO, J.A.A. **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015.

KOVAC, L., RASCHMANOVÁ, N., MIKLISOVÁ, D., 2005. Comparison of collembolan assemblages (Hexapoda, Collembola) of thermophilous oak woods and pinus nigra plantations in the slovak karst (slovakia). *Pedobiologia*, v. 49, n. 1, 29-40.

KRANTZ, G.W.; WALTER, D.E. **A manual of Acarology**. Texas Tech University Press, 2009.

LAVELLE, P. Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies that Determine Ecosystem Function. *Advances in Ecological Research*, v. 21, 1997.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J.P. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v.42, 2006.

LAVELLE, P.; MOREIRA, F.; SPAIN, A. Biodiversity: Conserving Biodiversity in Agroecosystems. In: VAN ALFEN, N.K. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, p. 41–60, Academic Press, 2014.

MACHADO, D.L.; PEREIRA, M.G.; CORREIA, M.E.F.; DINIZ, A. R.; MENEZES, C. E.G. Fauna Edáfica na Dinâmica Sucessional da Mata Atlântica em Floresta Estacional Semidecidual na Bacia do Rio Paraíba do Sul – RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 91-106, jan./mar., 2015.

MARTINS, P.J.; MAZON, J.A.; MARTINKOSKI, L.; BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L.F. Dinâmica da Vegetação Arbórea em Floresta Ombrófila Mista Montana Antropizada. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017. doi:10.1590/2179-8087.097014

MOREIRA, F.M.S.; CARES, J.E.; ZANETTI, R.; STURMER, S.L. **O ecossistema solo**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 352 p.

NIELSEN, U.N. Soil Fauna Assemblage Succession and Restoration. In: NIELSEN, U.N. In: **Soil Fauna Assemblages Global to Local Scales**. Cambridge University Press, 246 – 267.

OLEJNICZAK, I.; STERZYNSKA, M.; BONIECK, P.; KALISZEWICZ, A.; PANTELEEVA, N. Collembola (Hexapoda) as Biological Drivers between Land and Sea. *Biology*, v. 10, n. 568, 2021. <https://doi.org/10.3390/biology10070568>

OLIVEIRA, Y.M.M.; OLIVEIRA, E.B. **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

STEDILLE, L.I.B.; GOMES, J.P.; COSTA, N.C.F.; VARGAS, O.F.; LUZ, L.; MANTOVANI, A. Passive restoration of mixed ombrophilous forest a decade after forest plantation removal in the South of Brazil, **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 523–534. 2018a. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i4.55319>.

STEDILLE, L.I.B.; GOMES, J.P.; COSTA, N.C.F.; FERREIRA, P.I.; HIGUCHI, P.; MANTOVANI, A. Vegetative and environmental components in a secondary riparian forest in the southern plateau of Santa Catarina, Brazil. **Floram**, v. 25, n. 4, p. 1–11. 2018b. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.047316>.

SANKOVITZ, M. A.; BREED, M. D.; MCCREERY, H. F. Effects of *Formica podzolica* ant colonies on soil moisture, nitrogen, and plant communities near nests. **Ecological Entomology**, v. 44, n. 1, p. 71–80, 2019.

SIEBERS, N.; KRUSE, J. Short-term impacts of forest clear-cut on soil structure and consequences for organic matter composition and nutrient speciation: A case study. **Plos One**, ago., 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220476>

TĂUȘAN, I.; DAUBER, J.; TRICĂ, M.R.; MARKÓ, B. Succession in ant communities (Hymenoptera: Formicidae) in deciduous forest clear-cuts - an Eastern European case

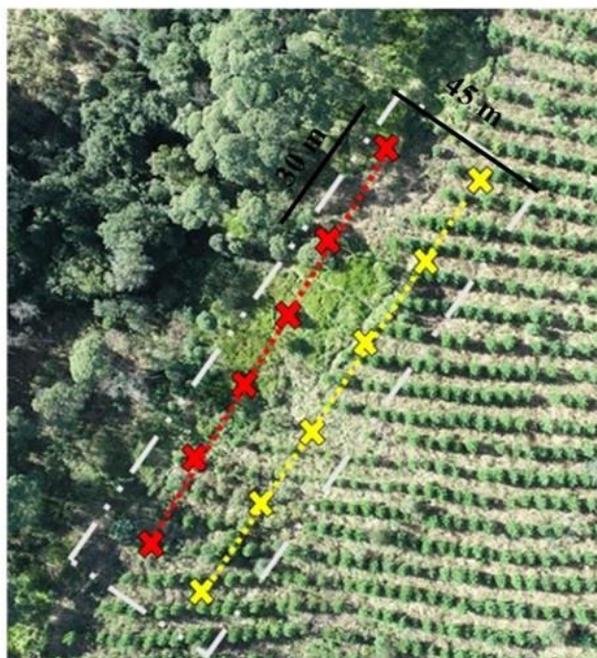
study. **European Journal of Entomology**, v. 114, p. 92-100, 2017.
<https://doi.org/10.14411/eje.2017.013>

TULANDE-M, E., BARRERA-CATAÑO, J.I., ALONSO-MALAVAR, C.E., MORANTES-ARIZA, C., BASTO, S., SALCEDO-REYES, J.C. Soil macrofauna in areas with different ages after *Pinus patula* clearcutting. **Universitas Scientiarum**, v. 23, n. 3, p. 383–417, 2018.

VICENTE, N.M.F.; CURTINHAS, J.N.; PEREZ, A.L.; PREZOTTI, L. Fauna Edáfica Auxiliando a Recuperação de Áreas Degradadas do Córrego Brejaúba, MG. **Floresta e Ambiente**, v. 17, n. 2, p. 104-110, 2010.

WIJAS, B.; ATKINSON, J. Termites in restoration - the forgotten insect? **Restoration Ecology**, v. 29, n. 8, nov., 2021.

YANG, X.; SHAO, M.; LI, T.; GAN, M.; CHEN, M. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau. **Ecological Indicators**, v. 122, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.10723>

MATERIAL SUPLEMENTAR**Figura S1.** Transectos com pontos de amostragem nas unidades amostrais: REGEN, PINUS (A), FOREST (B).

✘ REGEN ✘ PINUS

(A)



✘ FOREST

(B)

Tabela S1. Abundância dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas do estudo.

Grupos	REGEN – 4	REGEN – 10	PINUS – 4	PINUS – 10	FOREST
Acari	44	84	11	58	98
Aphinidae	15	30	1	4	9
Araneae	63	72	51	35	30
Blattodea	2	32	8	4	22
Chilopoda	10	2	7	4	19
Collembola	244	538	56	513	293
Coleoptera	119	100	110	15	97
Coleoptera (larva)	54	73	3	3	44
Dermaptera	3	1	0	1	0
Diplopoda	4	14	1	0	34
Diptera (larva)	2	10	0	1	152
Formicidae	1651	698	1470	264	106
Gastropoda	3	1	1	1	4
Hemiptera	7	16	5	1	0
Isopoda	3	0	0	0	5
Isoptera	23	273	47	1	73
Não identificados	14	23	6	3	0
Oligochaeta	3	9	1	0	6
Opiliones	2	4	3	0	0
Orthoptera	2	22	9	5	13
Pseudoscorpiones	0	1	0	0	1
Symphyla	1	8	0	0	0
Abundância total	2.269	2.011	1.790	913	1.006
Riqueza total	20	20	16	15	17

Tabela S2. Abundância relativa (AR) em % dos grupos taxonômicos da fauna do solo nas áreas do estudo.

Grupos	REGEN – 4	REGEN – 10	PINUS – 4	PINUS – 10	FOREST
Isopoda	0,13	0,00	0,00	0,00	0,50
Dermaptera	0,13	0,05	0,00	0,11	0,00
Pseudoscorpiones	0,00	0,05	0,00	0,00	0,10
Opiliones	0,09	0,20	0,17	0,00	0,00
Gastropoda	0,13	0,05	0,06	0,11	0,40
Symphyla	0,04	0,40	0,00	0,00	0,00
Oligochaeta	0,13	0,45	0,06	0,00	0,60
Hemiptera	0,31	0,80	0,28	0,11	0,00
Chilopoda	0,44	0,10	0,39	0,44	1,89
Não identificados	0,62	1,14	0,34	0,33	0,00
Diplopoda	0,18	0,70	0,06	0,00	3,38
Aphinidae	0,66	1,49	0,06	0,44	0,89
Blattodea	0,09	1,59	0,45	0,44	2,19
Orthoptera	0,09	1,09	0,50	0,55	1,29
Araneae	2,78	3,58	2,85	3,83	2,98
Isoptera	1,01	13,58	2,63	0,11	7,26
Coleoptera (Larva)	2,38	3,63	0,17	0,33	4,37
Diptera (Larva)	0,09	0,50	0,00	0,11	15,11
Coleoptera	5,24	4,97	6,15	1,64	9,64
Acari	1,94	4,18	0,61	6,35	9,74
Collembola	10,75	26,75	3,13	56,19	29,13
Formicidae	72,76	34,71	82,12	28,92	10,54

Tabela S3. Diferenças entre a abundância relativa (AR%) dos grupos taxonômicos da fauna do solo entre os 4 e 10 anos de regeneração (REGEN – 10 menos (-) REGEN – 4) e entre os 10 anos de regeneração e a floresta nativa (RECOV-10 - FOREST).

Grupos	REGEN – 10 - REGEN – 4	REGEN – 10 - FOREST
Isopoda	-0,13	-0,50
Dermaptera	-0,08	0,05
Pseudoscorpiones	0,05	-0,05
Opiliones	0,11	0,20
Gastropoda	-0,08	-0,35
Symphyla	0,35	0,40
Oligochaeta	0,32	-0,15
Hemiptera	0,49	0,80
Chilopoda	-0,34	-1,79
Não identificados	0,53	1,14
Diplopoda	0,52	-2,68
Aphinidae	0,83	0,60
Blattodea	1,50	-0,60
Orthoptera	1,01	-0,20
Araneae	0,80	0,60
Isoptera	12,56	6,32
Coleoptera (Larva)	1,25	-0,74
Diptera (Larva)	0,41	-14,61
Coleoptera	-0,27	-4,67
Acari	2,24	-5,56
Collembola	16,00	-2,37
Formicidae	-38,05	24,17

3 CAPÍTULO 3: ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DA FAUNA DO SOLO EM ÁREAS PÓS-COLHEITA DE PINUS

RESUMO

O monocultivo e colheita do pinus alteram a biodiversidade e a funcionalidade do solo. Ao longo do tempo, com a regeneração natural, estas alterações podem ser mitigadas, mas, para o sucesso desta regeneração é preciso investir em monitoramento. A fauna do solo é importante para a provisão de serviços ecossistêmicos e sensível as mudanças no solo, podendo ser indicadora de mudanças ecológicas ao longo do tempo e utilizada para o monitoramento ambiental do solo. O objetivo deste trabalho foi propor um índice para a avaliação da recuperação da fauna do solo nas áreas de regeneração natural pós-colheita do pinus. O índice em questão foi composto por indicadores que representem características importantes da comunidade da fauna do solo como dominância, frequência de ocorrência, abundância e funcionalidade dos grupos taxonômicos. A avaliação do índice foi realizada para os 4 e 10 anos de regeneração natural, utilizando como referência áreas de pinus adjacentes as áreas em regeneração (uso anterior) e áreas de floresta secundária. No resultado final do índice, houve diferenciação das áreas de estudo com resultados dentro do esperado, maiores valores para o índice na floresta, seguidos das áreas de regeneração com 4 e 10 anos e, menores valores do índice nas áreas pinus de 10 e 4 anos. Estes resultados são indicativos de mudanças e recuperação da estrutura da comunidade da fauna do solo. Porém, mesmo com estes resultados, que indicam mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo ao longo do processo de regeneração natural nas áreas pós-colheita de pinus, sabe-se que o cálculo dos indicadores e o método para a composição do índice de recuperação da fauna do solo, é uma proposta inicial que, precisa de ajustes para o uso prático em monitoramentos da recuperação da fauna do solo.

Palavras-chave: monitoramento, pós-colheita de pinus, fauna do solo.

ABSTRACT

The monoculture and harvesting of pine change the biodiversity and functionality of the soil. Over time, with natural regeneration, these changes can be mitigated, but for the success of this regeneration it is necessary to invest in monitoring. Soil fauna is important for the provision of ecosystem services and sensitive to changes in the soil, being able to be an indicator of ecological changes over time and used for soil environmental monitoring. The objective of this work was to propose an index for the evaluation of the recovery of soil fauna in the natural regeneration areas post-harvest of pine. The index in question was composed of indicators that represent important characteristics of the soil fauna community such as dominance, frequency of occurrence, abundance and functionality of taxonomic groups. The evaluation of the index was carried out for the 4 and 10 years of natural regeneration, using pine areas adjacent to areas in regeneration (previous use) and areas of secondary forest as a reference. In the final result of the index, there was a differentiation of the study areas with results within the expected, higher values for the index in the forest, followed by the areas of regeneration with 4 and 10 years and, lower values of the index in the pine areas of 4 and 10 years. These results are indicative of changes and recovery of the soil fauna community structure. However, even with these results, which indicate changes in the structure of the soil fauna community throughout the process of natural regeneration in the post-harvest areas of pine, it is known that the calculation of the indicators and the method for the composition of the index of recovery of soil fauna, is an initial proposal that needs adjustments for practical use in monitoring the recovery of soil fauna.

Keywords: monitoring, post-harvest pine, soil fauna.

4.1 INTRODUÇÃO

O monocultivo e colheita do pinus podem reduzir os grupos que compõem a fauna do solo, resultando em alterações e afetando as múltiplas funções ecossistêmicas realizadas pelos organismos desta comunidade. No entanto, estes grupos da fauna do solo e suas funções podem ser recuperados. Uma das formas de recuperação é a regeneração

natural, técnica passiva de restauração, onde as mudanças no ecossistema ocorrem em etapas intermediárias, ao longo do tempo. Dentro dos processos biológicos na regeneração natural, tem-se transformações na diversidade da fauna do solo que acompanham as mudanças na vegetação e vice-versa (GEISEN et al., 2019; FRAGOSO et al., 2017; TALUANE-M et al., 2018).

A recuperação da saúde do solo é essencial para que a regeneração natural ocorra de forma sustentável. Nesse sentido, ter um solo com saúde, está relacionado a ter um solo que funcione dentro dos limites do ecossistema e do uso do solo, para sustentar a produtividade florestal, garantir o desenvolvimento vegetal, a manutenção da biodiversidade e da estrutura de teia alimentar do solo (HATTEN e LILES, 2019).

Em um ecossistema edáfico resiliente e com saúde, a regeneração acontece de forma natural e espontânea, com recuperação da fauna, química e física do solo e também da vegetação. Isto porque, a fertilidade e a resiliência, são pilares críticos para a saúde do solo que, garantem o fornecimento contínuo de serviços ecossistêmicos (HATTEN e LILES, 2019).

Os esforços para alcançar o sucesso nos processos de restauração dos ecossistemas, estão ligados a busca da sociedade para mitigar ou minimizar as consequências negativas de uma alteração ou perturbação no ambiente. Isto implica em manter os solos com saúde e em consequência, garantir a provisão dos serviços ecossistêmicos essenciais para a manutenção da qualidade de vida no planeta.

Um das formas de garantir a recuperação dos espaços naturais é o monitoramento, através de índices, modelos ou mesmo de bioindicadores específicos. No caso dos índices e ou modelos relacionados ao solo, estes são compostos por indicadores sensíveis as mudanças no solo e representativos de funções chave. A identificação de indicadores químicos, físicos e biológicos, constitui o primeiro passo no estabelecimento de programas de acompanhamento dos processos de recuperação do solo (HATTEN e LILES, 2019; TRIANTAFYLLIDIS, et al., 2018; KAZMIERCZAK et al. 2020).

A fauna do solo através da composição da comunidade e da distribuição da abundância de indivíduos, indica mudanças ecológicas que refletem na qualidade química, física e microbiológica do solo (YANG et al., 2021). Além disso, a importância de incluir a fauna do solo no monitoramento do solo está no seu valor ecológico, relacionado a provisão de serviços de regulação (ex. fluxo de água no solo), suporte (ex.

ciclagem de nutrientes) e provisão (ex. fibras, madeira, grãos). Estes serviços são obtidos pela ação dos grupos funcionais da fauna do solo, classificados em micropredadores, reguladores, engenheiros do ecossistema, transformadores da serrapilheira e predadores (MENTA et al., 2012; DECAËNS et al., 2006; PASCUAL et al., 2015, LAVELLE et al., 1977; BRIONES, et al., 2018).

Diante da necessidade de monitoramento da recuperação do solo em áreas pós-colheita do pinus, o objetivo deste trabalho foi propor um índice para a avaliação da recuperação da fauna do solo na regeneração natural pós-colheita do pinus. Este índice foi composto por indicadores que representem características importantes da comunidade da fauna do solo: dominância, frequência de ocorrência, abundância e funcionalidade dos grupos taxonômicos. A avaliação do índice foi realizada para 4 e 10 anos de regeneração natural, utilizando como referência, áreas de pinus (uso anterior a regeneração) e áreas de floresta secundária. A hipótese do estudo é a de que através dos valores estabelecidos para os indicadores de características da comunidade da fauna do solo, é possível compor um índice, que demonstre os avanços na recuperação da estrutura da comunidade da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus, ao longo do tempo.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Local de estudo

O estudo foi realizado no município de Bocaina do Sul, no planalto sul de Santa Catarina, Brasil em uma fazenda florestal (27°44'04.7" S; 49°59'36.7"O) pertencente a Klabin S.A. A região onde encontra-se a fazenda é formada por campos nativos e remanescentes de Mata Atlântica, especificamente da Floresta Ombrófila Mista do tipo Montana, localizada em altitude de 860 m. O clima da região é mesotérmico úmido (Cfb) pela classificação Köppen (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2020; CARVER et al., 2002).

Nesta fazenda foram selecionadas 3 áreas pós-colheita de pinus com 4 e 10 anos de regeneração natural em Áreas de Preservação Permanente (APPs), 3 áreas adjacentes com plantio de pinus com 3 e 9 anos (áreas de plantio comercial) e ainda, 3 áreas de

floresta natural secundária, totalizando 6 tratamentos e 15 unidades amostrais. A classe de solo predominante nestas áreas é o Cambissolo húmico alumínico. O histórico de uso do solo e caracterização detalhada das unidades amostrais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de uso do solo e caracterização das áreas de estudo.

Unidade amostral	Histórico e caracterização
4 anos de regeneração REGEN – 4	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> até 2015. Áreas de preservação permanente (APP's) com regeneração natural com 4 anos, em processo inicial de revegetação secundária (arbustos, ervas e gramíneas). Solo recoberto por gramíneas, com alguns vestígios de deposição de restos culturais da colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
10 anos de regeneração REGEN – 10	Áreas com <i>P. taeda</i> até 2009. Área de APP com regeneração natural com 10 anos, em processo de revegetação mais avançado em termos de tempo e desenvolvimento da vegetação secundária (além de arbustos e ervas, espécies arbóreas como <i>Mimosa scabrella</i>). Solo recoberto por gramíneas e serrapilheira da vegetação secundária, sem vestígios de restos culturais da colheita do pinus.
Plantação de pinus adjacente a REGEN – 4: PINUS – 4	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> em 3º ciclo de plantio, idade do plantio: 3 anos. Áreas com árvores de pinus de pequena estatura. Plantio com boa parte do solo descoberto, mas, com alguns vestígios de restos culturais da última colheita do pinus (principalmente tocos e galhos).
Plantação de pinus adjacente a REGEN – 10 : PINUS – 10	Áreas com plantio de <i>P. taeda</i> em 2º ciclo de plantio, idade do plantio: 9 anos. Áreas com árvores de pinus de grande estatura. Plantio com o solo totalmente recoberto por acículas do pinus.
Floresta Natural FOREST	Vegetação natural, floresta secundária. Sem histórico de plantio comercial. Áreas com espécies vegetais típicas da Floresta Ombrófila Mista do tipo Montana, incluindo espécies arbóreas como <i>A. angustifolia</i> e além de plantas como <i>Dicksonia sellowiana</i> . Solo recoberto por serrapilheira destas espécies.

Em cada unidade amostral foram estabelecidos transectos com 6 pontos amostrais espaçados 30 m entre si, totalizando 18 pontos amostrais para cada tratamento ($n = 18$). Uma distância de 45 m foi mantida entre os transectos estabelecidos nas áreas de regeneração e pinus, nas áreas de floresta natural foi estabelecido apenas um transecto por área (Figura S1 A e B).

4.2.2 Coleta e caracterização da fauna do solo

As amostragens para estudo da fauna edáfica foram realizadas no verão de 2019, quando a temperatura média variou entre 17 e 26 °C com precipitação média de 3,6 mm, entre os dias de coleta. A fauna do solo foi coletada em cada ponto amostral, pelos métodos do monólito de solo e de armadilhas de queda. O método do monólito foi usado para coleta da macrofauna do solo e da serrapilheira, conforme Anderson e Ingram (1993). A armadilha de queda foi usada para a coleta da macrofauna e mesofauna da superfície do solo, conforme descrito por Baretta et al. (2014). Os organismos da fauna do solo foram identificados com base no nível taxonômico mais específico possível, com auxílio de um microscópio estereoscópico com aumento de 50 vezes. Os grupos Formicidae e Aphinidae foram classificados a nível de família, já Chilopoda, Collembola, Diplopoda, e Gastropoda a nível de classe e Oligochaeta como subclasse. Para os grupos Araneae, Blattodea, Coleoptera, Dermaptera, Hemiptera, Isopoda, Opiliones, Orthoptera e Diptera, a classificação foi a nível de ordem e para Isoptera de subordem.

4.2.3 Índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus

Estudos como os de Amacher et al. (2007), Triantafyllidis et al. (2018) e Mukherjee e Lal (2014), trabalharam com método aditivo simples para a composição de índices de qualidade do solo. Esse método consiste na soma dos valores de diferentes indicadores que compõem um índice final e individual, para a avaliação das áreas estudadas.

Neste método de composição de índices de qualidade do solo, Triantafyllidis et al. (2018), destacam que as etapas para a composição do índice são: 1. Selecionar indicadores importantes para expressar a qualidade do solo; 2. Atribuir pesos a estes indicadores; 3. Integrar as pontuações de forma a compor o índice final.

O presente trabalho construiu o índice de recuperação da fauna do solo desta forma: 1. Selecionaram-se indicadores para expressar características importantes da comunidade da fauna do solo e do seu processo de recuperação (dominância, frequência de ocorrência, abundância e funcionalidade); 2. Dentro do cálculo de cada um dos indicadores se atribuíram valores limites (range) que, representam a classificação numérica dos indicadores, para que possam ser interpretados e, aplicados a cada grupo taxonômico, gerando pesos (scores). Nesse ponto, os scores funcionam como uma escala sendo que, quanto maior o score do indicador, mais desejável é a característica que ele indica para o solo. Neste caso, para a comunidade da fauna do solo. 3. Calcularam-se os scores de cada indicador de forma a integrar as pontuações e compor o índice final para cada área avaliada. A construção dos indicadores, a aplicação do range, interpretação e scores foi baseada no trabalho de Mukherjee e Lal (2014). Para auxiliar no entendimento da construção do índice, a Tabela 2 descreve todos os indicadores que compõem o índice e ainda, o range, interpretação e score atribuído a cada indicador. As cores atribuídas ao range serão importantes para a descrição dos resultados.

Tabela 2. Discriminação e interpretação dos indicadores que compõem o índice de recuperação da fauna do solo.

Indicador	Range	Interpretação	Scores
Dominância	-	Não encontrado	0
	0 e 0,01	Domina menos de 1% da abundância, NÃO DOMINANTE	20
	0,01 e 0,10	Domina entre 1 e 10% da abundância, POUCO DOMINANTE	75
	0,11 e 0,29	Domina entre 11 e 29% da abundância, MODERADAMENTE DOMINANTE	100
	≥ 0,30	Domina entre mais de 30% da abundância, DOMINANTE	10
Frequência de ocorrência	-	Não encontrado	0
	0,01 e 0,10	Frequente entre 1 e 10% das amostras, RARO	20
	0,11 e 0,29	Domina entre 11 e 29% das amostras, FREQUENTE	50
	≥ 0,30	Frequente em entre mais de 30% das amostras, MUITO FREQUENTE	150
Contribuição dos grupos funcionais	-	Não encontrado	150
	1 e 10	grupo funcional tem BAIXA contribuição para os serviços ecossistêmicos	35
	11 e 100	grupo funcional tem MODERADA contribuição para os serviços ecossistêmicos	50
	≥ 101	grupo funcional tem ALTA contribuição para os serviços ecossistêmicos	150

Para expressar os cálculos dos indicadores (1) e do índice de recuperação da fauna do solo (IRFS) (2), são apresentadas as fórmulas a seguir:

- (1) Indicador = \sum Peso atribuídos através do range para cada grupo taxonômico;
- (2) IRFS = \sum Indicadores (dominância, frequência de ocorrência, contribuição dos grupos funcionais).

Para a proposição do índice de recuperação da fauna do solo em áreas de monitoramento florestal, dois referenciais foram utilizados: (i) com relação a floresta e (ii) com relação ao pinus. Trabalhou-se desta forma pela necessidade de critérios diferentes para avaliar a recuperação da fauna do solo, com relação a cada tipo de referencial.

Quando se tem floresta nativa como referência, por exemplo, o esperado em termos de recuperação da estrutura da fauna do solo é que as áreas de regeneração natural pós-colheita de pinus se assemelhem o máximo possível com a floresta nativa em termos de diversidade, estrutura da comunidade e oferta de serviços ecossistêmicos. Por outro lado, quando o pinus é o referencial, ele representa o uso anterior das áreas em regeneração e a comunidade da fauna do solo destas áreas, está sujeita as consequências do monocultivo do pinus. O que se espera é que as áreas de regeneração natural pós-colheita de pinus, sejam diferentes do pinus em termos de estrutura da fauna do solo, pois estão em processo de recuperação das alterações causadas pelo monocultivo e colheita do pinus para a comunidade da fauna do solo (perda de diversidade, dominância, redução na oferta de serviços ecossistêmicos).

4.2.4 Indicadores

4.2.4.1 Indicador de dominância

Para o cálculo do indicador de dominância, a abundância individual de cada grupo taxonômico foi dividida pela abundância total de organismos da fauna do solo coletada em cada área, representando o quanto cada grupo taxonômico domina a abundância total de organismos da comunidade da fauna do solo, de cada área estudada.

Os valores gerados para cada grupo taxonômico foram avaliados dentro do range estabelecido, sendo os grupos classificados como não dominante, pouco dominante, moderadamente dominante ou dominante. Para cada uma destas classificações foi estabelecido e aplicado um score (Tabela 2).

4.2.4.2 Indicador de frequência de ocorrência

Para o cálculo do indicador de frequência de ocorrência, em cada área estudada, avaliaram-se total de amostras coletadas, identificando a presença ou ausência dos grupos taxonômicos nas amostras, para a presença do grupo atribui-se o valor 1 e para a ausência o valor 0. Somaram-se os valores de presença/ausência de cada amostra e estes foram divididos pelo número total de amostras, obtendo o indicador frequência de ocorrência do grupo taxonômico em cada área. Os valores gerados para cada grupo taxonômico foram avaliados dentro doo range, sendo os grupos considerados: raros, pouco frequentes, frequentes e muito frequentes. Para cada uma destas classificações foi estabelecido e aplicado um score (Tabela 2).

4.2.4.3 Indicador de contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos

Este indicador considerou a abundância de cada grupo taxonômico nas áreas estudadas e a função de cada grupo nos serviços ecossistêmicos, conforme a classificação da Tabela 3. Por isso, o indicador foi calculado pela multiplicação da abundância pelo peso de importância atribuída aos grupos funcionais (Tabela 4 e 5). Os valores gerados para cada grupo taxonômico foram avaliados dentro do range estabelecido sendo os grupos considerados, como de baixa, modera e alta, contribuição para os serviços ecossistêmicos. Para cada uma destas classificações foi estabelecido e aplicado um score (Tabela 2).

Tabela 3. Classificação e pesos dos grupos taxonômicos de acordo com os grupos funcionais da fauna do solo.

Grupo funcional	Grupos taxonômicos	Peso
Transformadores da serrapilheira	Blattodea, Coleoptera, Coleoptera (Larva), Diptera (Larva), Diplopoda, Isopoda e Gastropoda	25
Predadores	Araneae, Chilopoda, Coleoptera, Coleoptera (Larva), Dermaptera, Opiliones	20
Micropredadores	Acari	15
Reguladores	Acari, Collembola	10
Engenheiros do Ecossistema	Formicidae, Isoptera, Oligochaeta	5
Outros	Aphinidae, Hemiptera, Orthoptera	1

Baseado em: Brown et al. (2015); Lavelle et al., (1997); Abgall et al., 2019; Santos et al., 2021; Santana et al., 2021.

Tabela 4. Critérios e justificativa do peso de grupo funcional.

Critério/peso	Justificativa
Transformadores da serrapilheira (TS) Peso = 25	<p>Este grupo tem o maior peso pois, sua atividade tem influência sobre outros grupos funcionais: predadores e reguladores, principalmente.</p> <p>A fragmentação do material vegetal pelos TS, permite a ação mais efetiva dos microrganismos responsáveis pela degradação e liberação de nutrientes. Os microrganismos são a fonte alimentar dos reguladores (LAVELLE, 1997).</p> <p>TS ajudam a sustentar níveis tróficos superiores pois, são regulados por predadores, sua recolonização em áreas em recuperação atrai grupos predadores (BARBERENA-ARIAS e AIDE, 2003; MACHADO et al., 2015).</p>
Predadores Peso = 20	<p>Nas teias alimentares clássicas estão no topo de cadeia o que, aumenta complexidade da estrutura da comunidade da fauna do solo. Tem função importante na regulação dos grupos da fauna edáfica (LAVELLE, 1997; BROWN et al., 2015; CORREIA et al., 2002). Por isso, esse grupo funcional, tem o segundo maior peso.</p>
Micropredadores Peso = 15	<p>Também tem função de predação no solo, controlam a população da mesofauna especialmente micrortrópodes e nematóides (KRANTZ e WALTER, 2009). Como controlam a população de reguladores, tem maior peso que esse grupo, sendo o terceiro maior peso dos grupos funcionais.</p>

Tabela 5. Critérios e justificativa do peso de grupo funcional – parte 2.

Critério/peso	Justificativa
Reguladores Peso = 10	Reguladores são grupos com impacto significativo na dinâmica populacional de microrganismos e na liberação de nutrientes imobilizados na biomassa microbiana. Este grupo funcional tem impacto sobre a ciclagem de nutrientes, processo que tem efeitos de recuperação mais rápidos do que os processos de recuperação da física do solo (ligados aos Engenheiros do Ecossistema - EE) (LAVELLE, 1997; BRADSHAW, 1992; 1997), por isso, estabeleceu-se um maior peso para os reguladores frente aos EE.
Engenheiros do Ecossistema (EE) Peso = 5	O grupo de EE, cria estruturas na física do solo a médio e longo prazo (LAVELLE, 1997). Devido aos efeitos no solo no sentido de recuperação da física do solo serem observados a longo prazo (LAL, 2015), os EE receberam menor pontuação do que os demais grupos funcionais.
Outros Peso = 1	Grupos que vivem no solo, mas, que não tem função específica, por isso tem pontuação mínima.
Critérios especiais - Dupla classificação	
Coleoptera e Coleoptera (Larva) TS e predadores Peso = 25 + 20 = 45	As famílias de Coleoptera mais representativas no solo podem ser tanto transformadoras da serrapilheira (Staphylinidae, Scarabaeidae), como predadoras (Carabidae) (POMPEO et al., 2020).
Acari Micropredadores e reguladores Peso = 15 + 10 = 25	Ácaros têm função de regulação de fungos e também podem preda nematóides e pequenos artrópodes (KRANTZ e WALTER, 2009).

4.3 RESULTADOS

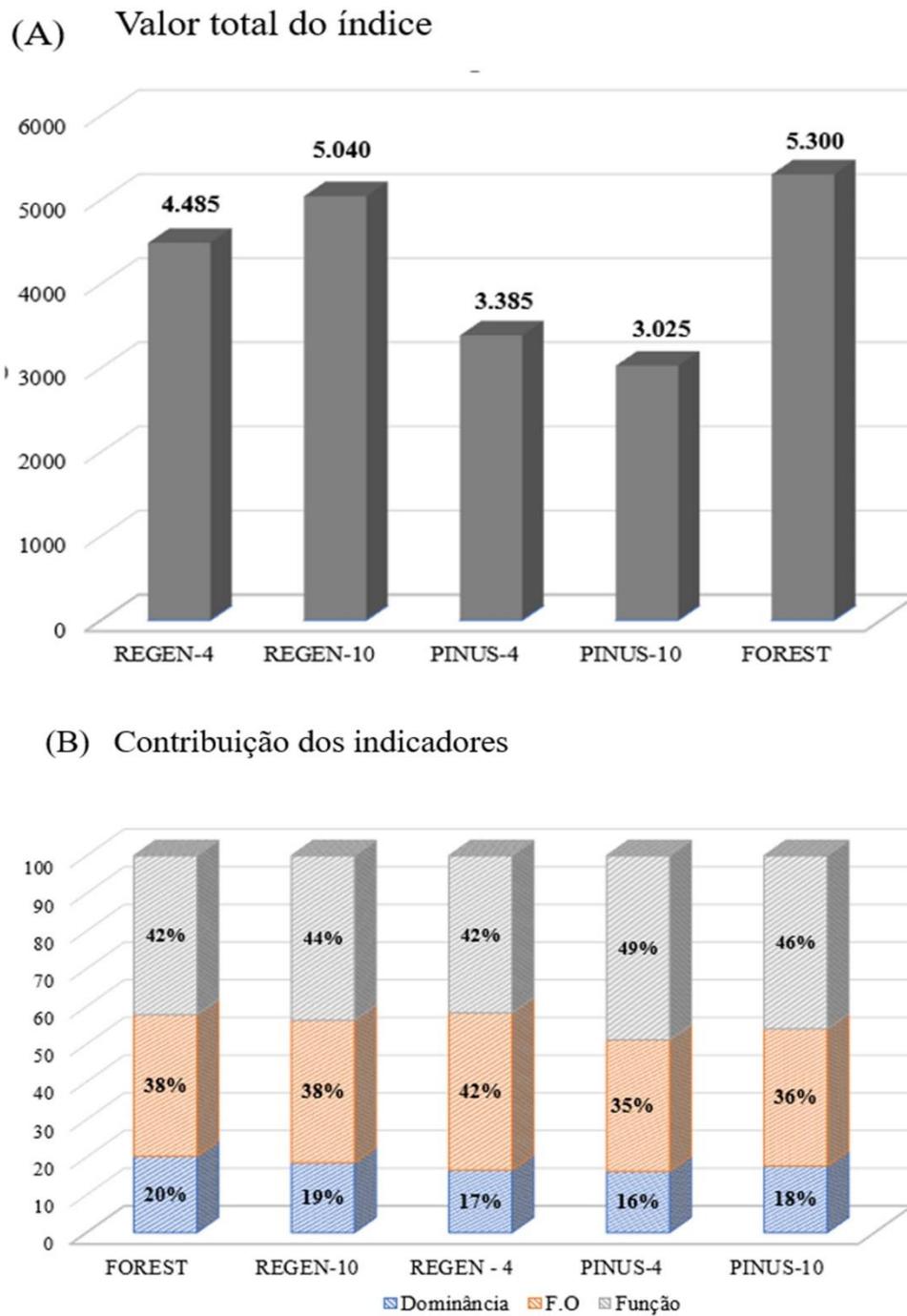
4.3.1 Índice de recuperação da fauna do solo

A soma dos scores dos indicadores de dominância, frequência de ocorrência e contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos levaram ao resultado

final do índice de recuperação da fauna do solo que, obteve o valor em ordem decrescente de 5.300 na floresta natural (referência), 5.040 na regeneração com 10 anos, 4.485 na regeneração com 4 anos, 3.385 no pinus adjacente a regeneração com 4 anos e 3.025 no pinus adjacente a regeneração com 10 anos (Figura 1A).

O valor índice de recuperação da fauna do solo na floresta foi composto em 42% pelo índice de dominância, em 38% pelo índice de frequência de ocorrência e em 20% pelo índice referente aos grupos funcionais (função). Na regeneração com 10 anos o índice foi composto em 44% pelo índice de dominância, em 38% pelo índice de frequência de ocorrência e em 19% pelo índice referente aos grupos funcionais. Na regeneração com 4 anos o índice foi composto em 42% pelo índice de dominância, em 42% pelo índice de frequência de ocorrência e em 17% pelo índice referente aos grupos funcionais. No pinus adjacente aos 4 anos de regeneração, o índice foi composto em 49% pelo índice de dominância, em 35% pelo índice de frequência de ocorrência e em 16% pelo índice referente aos grupos funcionais. No pinus adjacente aos 10 anos de regeneração índice foi composto em 46% pelo índice de dominância, em 36% pelo índice de frequência de ocorrência e em 18% pelo índice referente aos grupos funcionais (Figura 1B).

Figura 1. Valor final do índice de recuperação da fauna do solo (A) e contribuição de cada indicador (%) para a composição do índice para as áreas estudadas.

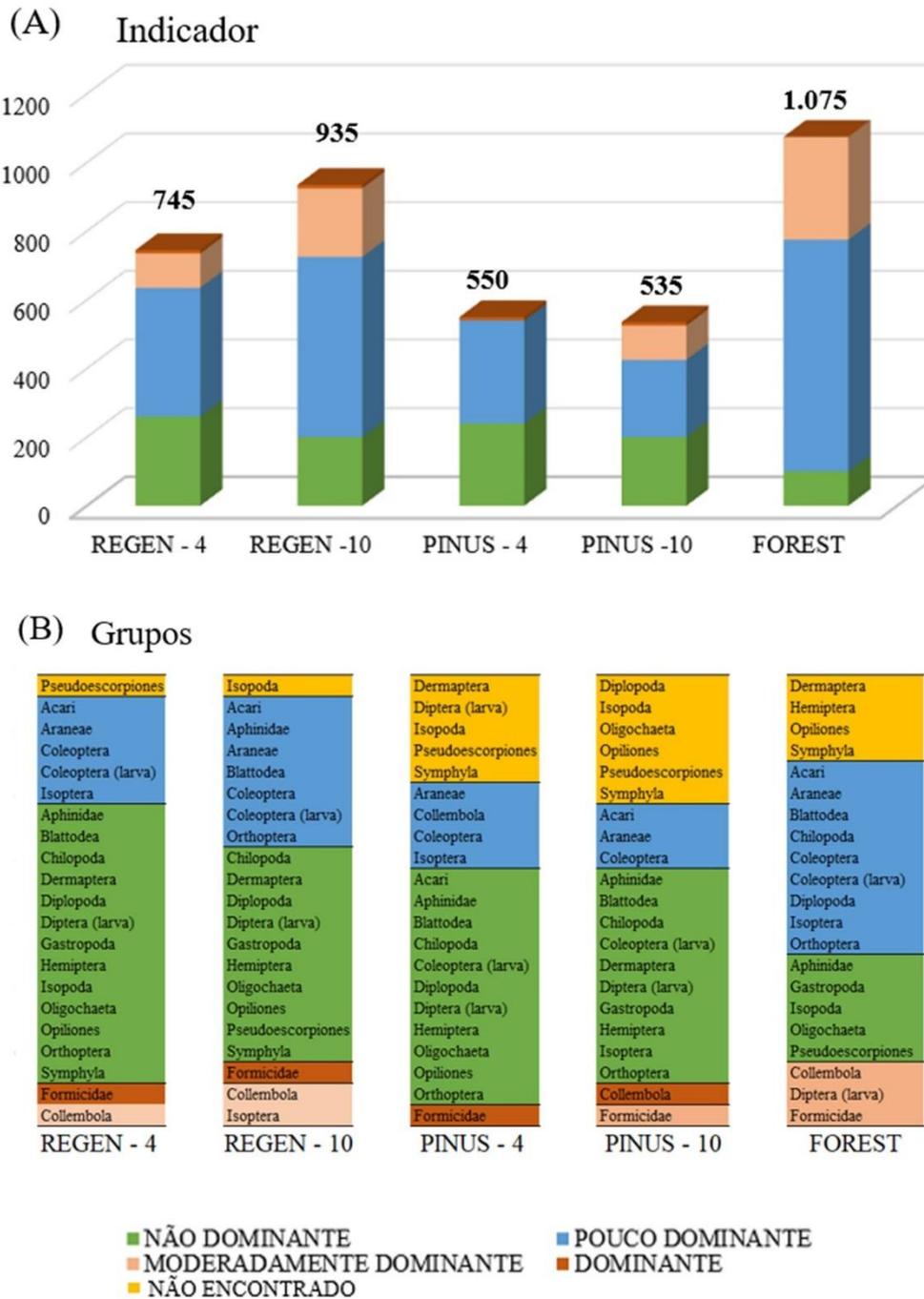


Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

4.3.1 Indicador de dominância

Para o indicador de dominância o maior valor foi obtido na floresta (1.075), seguido da regeneração com 10 anos (935), regeneração com 4 anos (745), pinus adjacente aos 4 anos de regeneração (550) e pinus adjacente aos 10 anos de regeneração (535) (Figura 2A). A descrição de quais grupos foram classificados em cada range e score, estão na Figura 2B. Na regeneração com 4 anos, 1 grupo foi classificado como moderadamente dominante e 1 grupo como dominante, os demais grupos foram 13 não dominantes e 5 pouco dominantes. Na regeneração com 10 anos, 2 grupos foram moderadamente dominantes, 1 grupo dominante, 10 não dominantes e 7 pouco dominantes. No pinus com 4 anos, apenas 1 grupo foi dominante, os demais foram não dominantes (12) ou pouco dominantes (4), não houve grupos moderadamente dominantes. No pinus com 10 anos, 1 grupo foi dominante, e 1 grupo foi moderadamente dominante, os demais foram não dominantes (10) ou pouco dominantes (3). Já na floresta, 3 grupos foram classificados como moderadamente dominantes, 5 como não dominantes e 9 como pouco dominantes, sendo que, nenhum grupo foi classificado como dominante. O resultado do indicador para cada grupo taxonômico se encontra na Tabela S1.

Figura 2. Valor do indicador de dominância (A) e grupos taxonômicos correspondentes a cada nível de classificação do indicador (B) para as áreas estudadas.



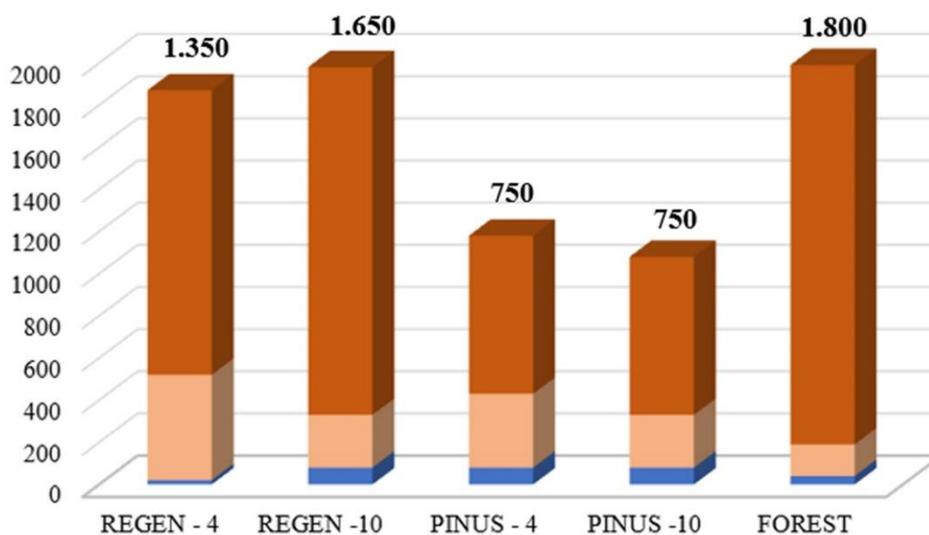
Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

4.3.2 Indicador de frequência de ocorrência

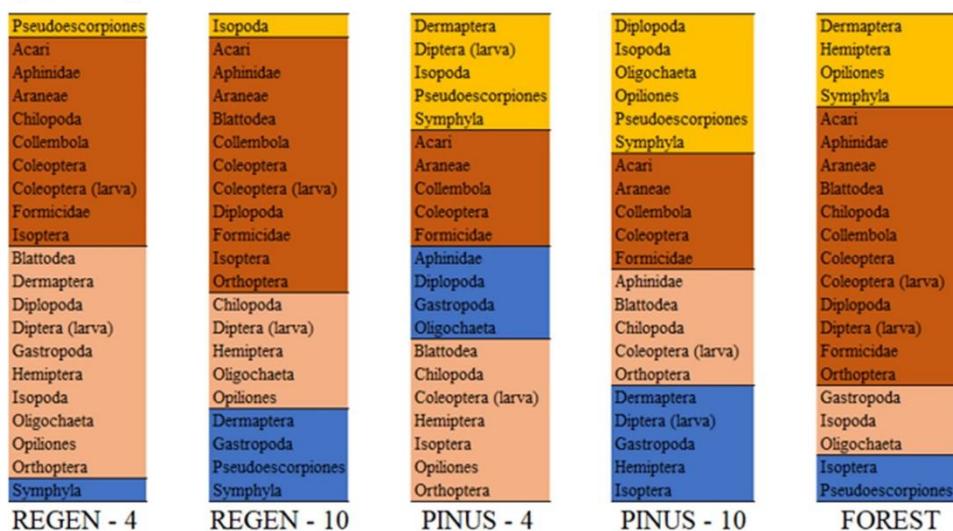
Para o indicador de frequência de ocorrência o maior valor foi obtido na floresta (1.800), seguido da regeneração com 10 anos (1.650), regeneração com 4 anos (745), pinus adjacente aos 4 anos e 10 de regeneração (750) (Figura 3A). Na regeneração com 4 anos, 1 grupo foi classificado como pouco frequente, 10 grupos como frequentes e 9 grupos como muito frequentes. Na regeneração com 10 anos, 4 grupos foram classificados como pouco frequentes, 5 grupos como frequentes e 11 grupos como muito frequentes. No pinus com 4 anos, 4 grupos foram classificados como pouco frequentes, 7 grupos como frequentes e 5 grupos como muito frequentes. No pinus com 10 anos, 4 grupos foram classificados como pouco frequentes, 5 grupos como frequentes e 5 grupos como muito frequentes. Na floresta, 2 grupos foram classificados como pouco frequentes, 3 grupos como frequentes e 12 grupos como muito frequentes. A descrição de quais grupos foram classificados em cada range e score estão na Figura 3B. O resultado do indicador para cada grupo taxonômico se encontra na Tabela S2.

Figura 3. Valor do indicador de frequência de ocorrência (A) e grupos taxonômicos correspondentes a cada nível de classificação do indicador (B) para as áreas estudadas.

(A) Índice



(B) Grupos



■ POUCO FREQUENTE ■ FREQUENTE ■ MUITO FREQUENTE
■ NÃO ENCONTRADO

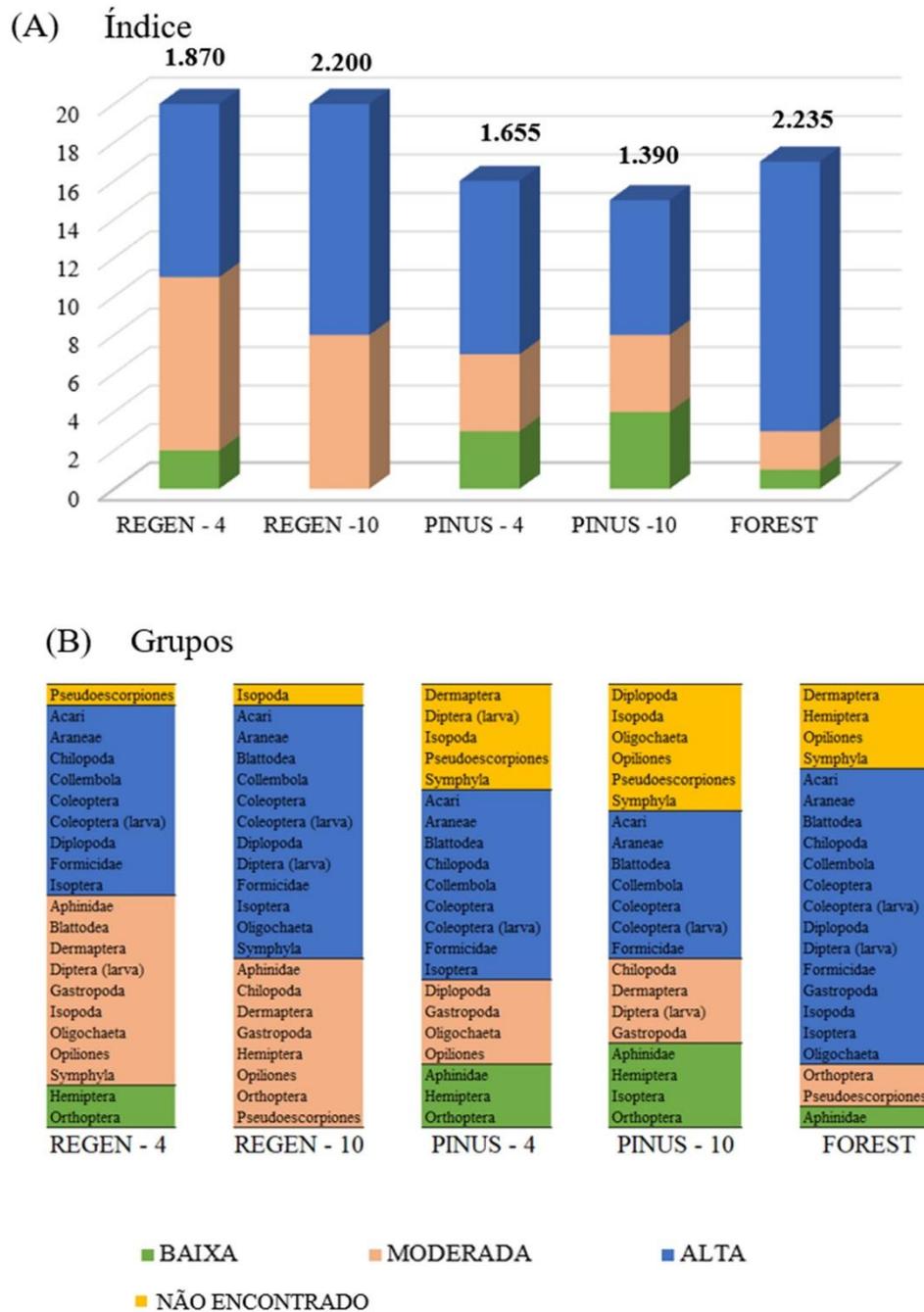
Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

4.3.3 Indicador de contribuição dos grupos funcionais

Para o indicador de contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos o maior valor foi obtido na floresta (2.235), seguido da regeneração com 10 anos (2.200), regeneração com 4 anos (1.870), pinus adjacente aos 4 anos de regeneração (1.655) e pinus adjacente aos 10 de regeneração (1.390) (Figura 4A).

Na regeneração com 4 anos, 2 grupos tiveram baixa contribuição para os serviços ecossistêmicos segundo a classificação proposta e ainda, 9 grupos com moderada e alta contribuição. Na regeneração com 10 anos, 8 grupos tiveram moderada e 12 grupos alta contribuição. No pinus com 4 anos foram 3 grupos classificados com baixa contribuição, 4 com moderada e 9 com alta contribuição. Já no pinus com 10 anos, foram 4 grupos com baixa e moderada contribuição e 7 grupos com alta contribuição. Na floresta, somente 1 grupo teve baixa contribuição, 2 grupos tiveram contribuição moderada e 14 grupos foram classificados com alta contribuição para os serviços ecossistêmicos, do ponto de vista funcional. A descrição de quais grupos foram classificados em cada range e score, estão na Figura 4B. O resultado do indicador para cada grupo taxonômico se encontra, se encontra na Tabela S3 e S4.

Figura 4. Valor do indicador de contribuição dos grupos funcionais (A) e grupos taxonômicos correspondentes a cada nível de classificação do indicador (B) para as áreas estudadas.



Descrição das áreas *vide* Tabela 1.

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Índice de recuperação da fauna do solo

O índice é uma proposição de método de avaliação da recuperação de áreas pós-colheita de pinus com base nas modificações da estrutura da comunidade da fauna do solo e, por isso, é importante abordar os aspectos e as justificativas que envolvem a sua construção, além dos resultados encontrados para as áreas de estudo. Inicialmente uma das características importantes do índice é que este, se baseia em grandes grupos e por isso, não é necessário a identificação taxonômica avançada dos grupos, tornando o uso do índice prático, rápido e acessível. Outra característica, é que o índice proposto é composto por três diferentes indicadores, aplicados aos grupos taxonômicos individualmente, o que pode ajudar a entender os processos de recuperação com mais detalhes.

Os índices de recuperação da fauna do solo, calculados para as áreas de estudo, foram eficientes para a diferenciar as áreas de regeneração, das áreas de pinus e da floresta, confirmando a hipótese do estudo. Dentro na trajetória de recuperação da estrutura da comunidade fauna do solo das áreas pós-colheita de pinus, os índices estiveram dentro do que se espera: houve aumento no valor do índice ao longo da regeneração entre os 4 e 10 anos, se aproximando cada vez mais da área de referência (floresta) que, portanto, teve maior valor para o índice, dentre as áreas estudadas. Por outro lado, as áreas de pinus, obtiveram menores valores para o índice, do que as áreas em regeneração.

De forma geral, a riqueza de grupos teve influência nos resultados dos índices, pois, afetou o resultado individual de cada indicador. Áreas com maior riqueza tiveram maior número de grupos pontuando dentro do score em cada indicador; já áreas com menor riqueza, tiveram menos grupos pontuando em cada indicador, o que pode ter influenciado o valor final do índice de recuperação da fauna do solo. Nesse sentido, na regeneração com 4 e 10 anos, se obteve a maior riqueza, 20 grupos, nas áreas de pinus foram encontrados 16 grupos no pinus com 4 anos, 15 grupos no pinus com 10 anos e 17 grupos na floresta.

4.4.2 Indicador de dominância

O indicador de dominância visa identificar quais grupos taxonômicos da fauna do solo contribuem para menor ou maior dominância, dentro da abundância total de organismos de cada área estudada. A dominância de uma espécie em relação as demais dentro de uma comunidade é uma característica ecológica que apresenta efeitos proporcionais na diversidade da comunidade e sobre as funções do ecossistema. Por isso, espécies dominantes podem interferir no habitat e na disponibilidade de recursos, afetando a abundância e a atividade de outras espécies (AVOLIO et al., 2019; BRIONES, 2014).

A dominância é uma condição desfavorável para a comunidade da fauna do solo, por isso o menor score foi definido para grupos classificados como dominantes. O ideal para a comunidade da fauna do solo, seria ter grupos pouco ou moderadamente dominantes, pois podem contribuir para a abundância total de organismos de uma comunidade através das suas funções, sem limitar os recursos de outros grupos, como em uma condição de dominância.

Nesse estudo, o que se observou foi que entre o indicador de dominância do pinus e da regeneração com 4 anos, a principal diferença encontrada foi o surgimento de grupos moderadamente dominantes. O grupo Collembola que no pinus era pouco dominante, na regeneração passou a ser moderadamente dominante. Nestas duas áreas apenas um grupo, Formicidae, foi dominante, tanto na regeneração, quanto no pinus com 4 anos.

Para o indicador de dominância do pinus e da regeneração com 10 anos, a principal mudança entre uma área e outra, foi o aumento dos grupos classificados como pouco dominantes. Grupos que no pinus eram não dominantes como Aphinidae, Blattodea, Coleoptera (larva) e Orthoptera, na regeneração foram classificados como pouco dominantes. Apenas o grupo Collembola foi dominante no pinus, já na regeneração, apenas Formicidae foi dominante.

A floresta não apresentou grupos dominantes. Além disso, na floresta houve maior número de grupos moderadamente dominantes do que nas áreas de regeneração com 4 e 10 anos. Na floresta, a maior parte dos grupos foram classificados como pouco dominantes e nas áreas de regeneração com 4 e 10 anos, a maior parte dos grupos foi não dominante.

Os resultados indicam que nas áreas de regeneração a estrutura da comunidade é formada por um grupo dominante que impacta na distribuição da abundância total entre os demais grupos. Os outros grupos foram de baixa contribuição para a abundância total (não dominantes).

Nesse sentido, as áreas de regeneração já apresentarem mudanças positivas na estrutura da comunidade com relação ao pinus com aumento na contribuição de determinados grupos para abundância total, sem representar dominância. No entanto, as áreas de regeneração, ainda são diferentes da floresta, com relação a distribuição das abundâncias entre os grupos taxonômicos.

4.4.3 Indicador de frequência de ocorrência

A frequência de ocorrência é uma medida de incidência, ou seja, presença ou ausência de grupos ou espécies nos pontos de amostragem (BASUALDO, 2011). A frequência de ocorrência é utilizada para descrever a composição de espécies ou grupos de uma comunidade. Esta característica da comunidade, pode ser uma forma de expressar e ampliar a ideia de riqueza de grupos, pois mostra quais grupos estão presentes nos diversos pontos das áreas de estudo, tirando o viés de amostras com elevado número de organismos em um único ponto amostral. Assim, o indicador de frequência de ocorrência avaliou a uniformidade da distribuição dos grupos taxonômicos nos pontos de amostragem das áreas estudadas.

Considerou-se que grupos raros ou pouco frequentes estão distribuídos de forma pouco homogênea, em apenas alguns pontos das áreas, o que pode limitar as atividades destes grupos nas áreas. Por isso, grupos raros ou pouco frequentes foram classificados com menores scores. Já grupos classificados como frequentes ou muito frequentes apresentam maior homogeneidade de distribuição nas áreas, o que pode representar uma distribuição mais homogênea das suas atividades nas áreas. Então, grupos frequentes ou muito frequentes foram classificados com maiores scores.

O que se observou foi que ao comparar o pinus e a regeneração com 4 anos, houve aumento no número de grupos frequentes e muito frequentes, além da redução de grupos pouco frequentes. Na regeneração com 4 anos somente um grupo, *Shympyla*, foi

classificado como pouco frequente. Entre o pinus e a regeneração com 10 anos, a principal mudança foi o aumento dos grupos muito frequentes.

Nota-se que nas comparações das áreas de regeneração com o pinus aos 4 e 10 anos, os grupos vão se tornando mais frequentes nas áreas de regeneração do que eram no pinus. Este resultado é positivo e indica que, a estrutura da comunidade da fauna do solo vai se tornando mais uniforme com relação a presença dos grupos, nas áreas de regeneração, após a colheita do pinus.

Na comparação das áreas de regeneração de 4 e 10 anos com a floresta, tanto nas áreas de regeneração quanto na floresta a maior parte dos grupos foram classificados como muito frequentes. Nesse sentido, há mais um indicativo de que as áreas de regeneração estão avançando no sentido de se tornarem mais uniformes com relação a presença dos grupos taxonômicos.

4.4.4 Indicador de contribuição dos grupos funcionais

A importância funcional dos organismos do solo não é quantificada apenas pela abundância numérica de indivíduos (BRIONES, 2014). É preciso também, levar em consideração que os grupos taxonômicos da fauna do solo apresentam diferentes funções no solo e cada uma destas funções, tem um grau de importância para o solo (Tabela 4).

Por isso, o indicador de contribuição dos grupos funcionais levou em conta dois fatores, a abundância e a importância das atividades dos grupos funcionais da fauna do solo. Os pesos dados para a importância das atividades dos grupos funcionais consideraram a atividade desenvolvida pelo grupo e a influência sobre a atividade e desenvolvimento de outros grupos (Tabela 4).

No resultado do indicador, a combinação da abundância e peso dos grupos funcionais classificou os grupos taxonômicos da fauna do solo como grupos com baixa (score de menor valor), moderada (score médio) e alta (score de maior valor) e contribuição para os serviços ecossistêmicos.

Ao comparar a regeneração com o pinus aos 4 anos, a principal diferença encontrada foi o maior número de grupos com moderada contribuição para os serviços ecossistêmicos na regeneração. Já na comparação regeneração com o pinus aos 10 anos,

observou-se na regeneração menor número de grupos com baixa contribuição e maior número de grupos com moderada e alta contribuição.

Na comparação das áreas em regeneração com 4 e 10 anos com a floresta, observa-se que a maior parte dos grupos apresentou alta contribuição para os serviços ecossistêmicos. Estes resultados indicam que, a após a colheita do pinus, ao longo da regeneração há uma tendência de que os grupos aumentem a sua contribuição para os serviços ecossistêmicos em função da sua abundância e da importância das suas funções no solo, se aproximando da contribuição dos grupos presentes na área de referência (floresta).

4.5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

O índice foi eficiente na diferenciação das áreas de estudo com resultados dentro do esperado. Foram encontrados maiores valores para o índice na área de referência, a floresta, seguidos das áreas de regeneração com 4 e 10 anos. Os menores valores do índice, foram para as áreas pinus de 10 e 4 anos.

Estes resultados demonstraram mudanças e recuperação da estrutura da comunidade da fauna do solo nas áreas em regeneração pós-colheita do pinus, ao longo do tempo.

O cálculo dos indicadores e o método para a composição do índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus, é uma proposta inicial. Portanto, precisa de ajustes e validações, para o seu uso prático em monitoramentos da recuperação da fauna do solo.

REFERÊNCIAS

- ABGRALL, C.; FOREY, E.; CHAUVAT, M. Soil fauna responses to invasive alien plants are determined by trophic groups and habitat structure: a global meta-analysis. *Oikos*, v. 128, p. 1390–1401, 2019.
- ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I. **Tropical Soil Biology and Fertility: A Handbook of Methods**. CAB International, 1993.
- AVOLIO, M.L.; FORRESTEL, E.J.; CHANG, C.C.; PIERRE, K.J.L.; BURGHARDT, K.T.; SMITH, M.D. Demystifying Dominant Species. *New Phytologist*, v. 223, p. 1106–1126, 2019.
- BARBERENA-ARIAS, M.F.; AIDE, T. M. Species diversity and trophic composition of litter insects during plant secondary succession. *Caribbean Journal of Science*, v. 39, n. 2, p. 161–169, 2003.
- BARETTA, D.; BARTZ, M.L.C.; FACHINI, I.; ANSELMINI, R.; ZORTÉA, T., MALUCHE BARETTA, R.D.C. Fauna edáfica e sua relação com variáveis ambientais em sistemas de manejo do solo. *Revista Ciência Agronômica*, v. 5, p. 871–879, 2014.
- BASUALDO, C.V. Choosing the best non-parametric richness estimator for benthic macroinvertebrates databases. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, v. 1-2, p. 27-38, 2011.
- BRADSHAW, A. Restoration of mined lands – using natural processes. *Ecological Engineering*, v.8, p.255-269, 1997.
- BRADSHAW, A.D. The biology of land restoration. In: JAIN, S.K.; BOTSFORD, L.W. (Eds.). **Applied Population Biology**, Kluwer, Dordrecht, p. 25-44, 1992.
- BRIONES, M.J.I. The Serendipitous Value of Soil Fauna in Ecosystem Functioning: The Unexplained Explained. *Frontiers in Environmental Science*, v. 6, n. 149, 2018. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00149
- BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G; FERREIRA, S.A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G.A.; PASINI, A.; BARTZ, L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E.; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA E.B.; BROWN, G.G.; PRADO, RB. **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.
- CARVER, S.; MIKKELSEN, N.; WOODWARD, J. Long-term rates of mass wasting in Mesters Vig, northeast Greenland: Notes on a re-survey. *Permafrost and Periglacial Processes*, v. 13, n. 3, p. 243–249, 2002.
- CORREIA, M. E. F. Relações entre a diversidade da fauna de solo e o processo de decomposição e seus reflexos sobre a estabilidade dos ecossistemas. *Embrapa Agrobiologia*, documentos n.156, dez. 2002.

DECAËNS, T.; JIMÉNEZB, J.J.; GIOIAC, C.; MEASEYB, G.J.; LAVELLE, P. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, 2006.

FRAGOSO, R.O.; CARPANEZZI, A.A.; KOEHLER, H.S.; ZUFFELLATO-RIBAS, K.C. Barreiras ao Estabelecimento da Regeneração Natural em Áreas de Pastagens Abandonadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1451-1464, dez., 2017.

GEISEN, S.; WALL, D. H.; VAN DER PUTTEN, W. H. Challenges and Opportunities for Soil Biodiversity in the Anthropocene. **Current Biology**, v. 29, n. 19, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.007>

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Conheça SC/ Municípios – Bocaina do Sul**. 2019. Disponível em: <<https://www.sc.gov.br/conhecasc/municipios-de-sc/bocaina-do-sul>>. Acesso em jun.2022.

HATTEN, J.; LILES, G. A ‘healthy’ balance - The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. In: Busse, M.; Giardina, C.; Morris, D.; Page-Dumroese, D. **Global Change and Forest Soils**. Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00015-X>

KAZMIERCZAK, R.; GIARIOLA, N.F.B.; F.B.; SANTOS, J.B.; FOGAÇA, A.M.; CARPINELLI, S. Selection of Indicators to Discriminate Soil Tillage Systems and to Assess Soil Quality in a Red Latosol. Brazilian **Archives of Biology and Technology**, v. 63 no.spe: e20190489, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2020190489>

KRANTZ, G.W.; WALTER, D.E. A manual of Acarology. Texas Tech University Press, 2009.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, n. 7, p. 5875-5895, 2015. doi:10.3390/su7055875.

LAVELLE, P. Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies that Determine Ecosystem Function. **Advances in Ecological Research**, v. 21, 1997.

MACHADO, D.L.; PEREIRA, M.G.; CORREIA, M.E.F.; DINIZ, A. R.; MENEZES, C. E.G. Fauna Edáfica na Dinâmica Sucessional da Mata Atlântica em Floresta Estacional Semidecidual na Bacia do Rio Paraíba do Sul – RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 91-106, jan./mar., 2015.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **Plos One**, v. 9, n. 8, 2014.

PASCUAL, U.; TERMANSEN, M.; KATARINA HEDLUND, K.; BRUSSAARD, L.; FABER, J.H.; FOUADI, S.; LEMANCEAU, P.; JØRGENSEN, S.L. On the value of soil biodiversity and ecosystem services. **Ecosystem Services**, n. 15, p. 11–18, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.06.002>

POMPEO, P.N.; Oliveira Filho, L.C.I; KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; BARETTA, D. Coleoptera Diversity and Soil Properties in Land Use Systems. **Floresta e Ambiente**, n. 27, v. 3, 2020. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.006818>

SANTANA, M.S.; ANDRADE, E.M.; OLIVEIRA, V.R.; COSTA, B.B.; SILVA, V.C.; FREITAS, M.S.C.; CUNHA, J.F.; GIONGO, V. Trophic groups of soil fauna in semiarid: Impacts of land use change, climatic seasonality and environmental variables. **Pedobiologia - Journal of Soil Ecology**, v. 89, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2021.150774>

SANTOS, R.N.; CABREIRA, W.V.; PEREIRA, M.G.; SOUZA, R.C.; LIMA, S.S.; LOUZADA, M.A.P.; SANTOS, G.L.; SILVA, A.C.R. Community Ecology of Soil Fauna Under Periodically Flooded Forest and Anthropic Fields. **Floresta e Ambiente**, v. 1, n. 28, 2021. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2020-0052>

TULANDE-M, E., BARRERA-CATAÑO, J.I., ALONSO-MALAVAR, C.E., MORANTES-ARIZA, C., BASTO, S., SALCEDO-REYES, J.C. Soil macrofauna in areas with different ages after *Pinus patula* clearcutting. **Universitas Scientiarum**, v. 23, n. 3, p. 383–417, 2018.

TRIANAFYLLIDIS, V.; KOSMA, A. K.C.; PATAKAS, A. An Assessment of the Soil Quality Index in a Mediterranean Agro Ecosystem. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 30, n. 12, p. 1042-1050, 2018. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i12.1886>

YANG, X.; SHAO, M.; LI, T.; GAN, M.; CHEN, M. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau. **Ecological Indicators**, v. 122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.1072>.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Figura S1. Transectos com pontos de amostragem nas unidades amostrais: REGEN, PINUS (A), FOREST (B).



✘ REGEN ✘ PINUS

(A)



✘ FOREST

(B)

Tabela S1. Resultado do indicador de dominância por grupo taxonômico para as áreas estudadas.

Área	REGEN - 4		REGEN -10		PINUS - 4		PINUS -10		FOREST	
Grupos	Indicador	Score								
Acari	0,02	75	0,04	75	0,01	20	0,06	75	0,10	75
Aphinidae	0,01	20	0,02	75	0,00	20	0,00	20	0,01	20
Araneae	0,03	75	0,04	75	0,03	75	0,04	75	0,03	75
Blattodea	0,00	20	0,02	75	0,00	20	0,00	20	0,02	75
Chilopoda	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,02	75
Collembola	0,11	100	0,27	100	0,03	75	0,56	10	0,29	100
Coleoptera	0,05	75	0,05	75	0,06	75	0,02	75	0,10	75
Coleoptera (larva)	0,02	75	0,04	75	0,00	20	0,00	20	0,04	75
Dermaptera	0,00	20	0,00	20	-	0	0,00	20	-	0
Diplopoda	0,00	20	0,01	20	0,00	20	-	0	0,03	75
Diptera (larva)	0,00	20	0,01	20	0,00	20	0,00	20	0,15	100
Formicidae	0,73	10	0,35	10	0,82	10	0,29	100	0,11	100
Gastropoda	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00	20
Hemiptera	0,00	20	0,01	20	0,00	20	0,00	20	-	0
Isopoda	0,00	20	-	0	-	0	-	0	0,00	20
Isoptera	0,01	75	0,14	100	0,03	75	0,00	20	0,07	75
Oligochaeta	0,00	20	0,00	20	0,00	20	-	0	0,01	20
Opiliones	0,00	20	0,00	20	0,00	20	-	0	-	0
Orthoptera	0,00	20	0,01	75	0,01	20	0,01	20	0,01	75
Pseudoscorpiones	-	0	0,00	20	-	0	-	0	0,00	20
Symphyla	0,00	20	0,00	20	-	0	-	0	-	0
Total		745		935		550		535		1.075

Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Classificação das cores *vide* Tabela S3.

Tabela S2. Resultado do indicador de frequência de ocorrência por grupo taxonômico para as áreas estudadas.

Área	REGEN - 4		REGEN -10		PINUS - 4		PINUS -10		FOREST	
Grupos	Indicador	Score								
Acari	0,61	150	0,94	150	0,44	150	0,83	150	1,00	150
Aphinidae	0,39	150	0,44	150	0,06	20	0,17	50	0,33	150
Araneae	1,00	150	0,89	150	0,78	150	0,83	150	0,78	150
Blattodea	0,11	50	0,67	150	0,28	50	0,22	50	0,50	150
Chilopoda	0,44	150	0,11	50	0,22	50	0,17	50	0,50	150
Collembola	1,00	150	1,00	150	0,72	150	1,00	150	0,94	150
Coleoptera	0,83	150	1,00	150	0,78	150	0,50	150	0,94	150
Coleoptera (larva)	0,78	150	0,83	150	0,17	50	0,17	50	0,67	150
Dermaptera	0,11	50	0,06	20	-	0	0,06	20	-	0
Diplopoda	0,22	50	0,33	150	0,06	20	-	0	0,78	150
Diptera (larva)	0,11	50	0,28	50	-	0	0,06	20	0,44	150
Formicidae	1,00	150	1,00	150	1,00	150	1,00	150	0,89	150
Gastropoda	0,17	50	0,06	20	0,06	20	0,06	20	0,22	50
Hemiptera	0,22	50	0,28	50	0,17	50	0,06	20	-	0
Isopoda	0,17	50	-	0	-	0	-	0	0,28	50
Isoptera	0,39	150	0,44	150	0,22	50	0,06	20	0,11	20
Oligochaeta	0,17	50	0,28	50	0,06	20	-	0	0,28	50
Opiliones	0,11	50	0,17	50	0,11	50	-	0	-	0
Orthoptera	0,11	50	0,50	150	0,28	50	0,17	50	0,50	150
Pseudoscorpiones	-	0	0,06	20	-	0	-	0	0,06	20
Symphyla	0,06	20	0,06	20	-	0	-	0	-	0
Total		1.870		1.980		1.180		1.100		1.990

Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Classificação das cores *vide* Tabela S3.

Tabela S3. Resultado do indicador de contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos, por grupo taxonômico para as áreas de regeneração natural.

Área		REGEN-4				REGEN-10			
Grupos	Classificação	Abundância	Peso	Indicador	Score	Abundância	Peso	Indicador	Score
Acari	Micro + reg	44	25	1.100	150	84	25	2.100	150
Aphinidae	Outros	15	1	15	50	30	1	30	50
Araneae	Pred	63	20	1.260	150	72	20	1.440	150
Blattodea	TS	2	25	50	50	32	25	800	150
Chilopoda	Pred	10	20	200	150	2	20	40	50
Collembola	Reg	244	10	2.440	150	538	10	5.380	150
Coleoptera	TS+ Pred	119	45	5.355	150	100	45	4.500	150
Coleoptera (larva)	TS+Pred	54	45	2.430	150	73	45	3.285	150
Dermaptera	Pred	3	20	60	50	1	20	20	50
Diplopoda	TS	4	25	100	150	14	25	350	150
Diptera (larva)	TS	2	25	50	50	10	25	250	150
Formicidae	EE	1.651	5	8.255	150	698	5	3.490	150
Gastropoda	TS	3	25	75	50	1	25	25	50
Hemiptera	Outros	7	1	7	35	16	1	16	50
Isopoda	TS	3	25	75	50	-	-	-	-
Isoptera	EE	23	5	115	150	273	5	1.365	150
Oligochaeta	TS+EE	3	30	90	50	9	30	270	150
Opiliones	Pred	2	20	40	50	4	20	80	50
Orthoptera	Outros	2	1	2	35	22	1	22	50
Pseudoscorpiones	Pred	-	-	-	-	1	20	20	50
Symphyla	Pred	1	20	20	50	8	20	160	150
Total					1.870				2.200

Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Classificação das cores *vide* Tabela S3.

Tabela S4. Resultado do indicador de contribuição dos grupos funcionais para os serviços ecossistêmicos, por grupo taxonômico para as áreas de pinus e floresta.

Área		PINUS-4				PINUS-10				FOREST			
Grupos	Classificação	Abundância	Peso	Indicador	Score	Abundância	Peso	Indicador	Score	Abundância	Peso	Indicador	Score
Acari	Micro + Reg	11	25	275	150	58	25	1.450	150	98	25	2.450	150
Aphinidae	Outros	1	1	1	35	4	1	4	35	9	1	9	35
Araneae	Pred	51	20	1.020	150	35	20	700	150	30	20	600	150
Blattodea	TS	8	25	200	150	4	25	100	150	22	25	550	150
Chilopoda	Pred	7	20	140	150	4	20	80	50	19	20	380	150
Collembola	Reg	56	10	560	150	513	10	5.130	150	293	10	2.930	150
Coleoptera	TS+ Pred	110	45	4.950	150	15	45	675	150	97	45	4.365	150
Coleoptera (larva)	TS+Pred	3	45	135	150	3	45	135	150	44	45	1.980	150
Dermaptera	Pred	-	-	-	-	1	20	20	50	-	-	-	-
Diplopoda	TS	1	25	25	50	-	-	-	-	34	25	850	150
Diptera (larva)	TS	-	-	-	-	1	25	25	50	152	25	3.800	150
Formicidae	EE	1.470	5	7.350	150	264	5	1.320	150	106	5	530	150
Gastropoda	TS	1	25	25	50	1	25	25	50	4	25	100	150
Hemiptera	Outros	5	1	5	35	1	1	1	35	-	-	-	-
Isopoda	TS	-	-	-	-	-	-	-	-	5	25	125	150
Isoptera	EE	47	5	235	150	1	5	5	35	73	5	365	150
Oligochaeta	TS+EE	1	30	30	50	-	-	-	-	6	30	180	150
Opiliones	Pred	3	20	60	50	-	-	-	-	-	-	-	-
Orthoptera	Outros	9	1	9	35	5	1	5	35	13	1	13	50
Pseudoscorpiones	Pred	-	-	-	-	-	-	-	-	1	20	20	50
Symphyla	Pred	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total					1.655				1.390				2.235

Descrição das áreas *vide* Tabela 1. Classificação das cores *vide* Tabela 2. Micro = micropredador, Reg = regulador, Pred = predador, TS = transformador da serrapilheira, EE = engenheiro do ecossistema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS

O Capítulo 1 demonstrou que os processos de recuperação da fauna do solo se iniciam rapidamente e já mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo, em uma curta escala de tempo (4 anos), independentemente do tipo de solo. As propriedades solos estão relacionadas a estes processos de recuperação da fauna edáfica.

O Capítulo 2 trabalhou com a escala temporal de recuperação da fauna do solo, entre os 4 e 10 anos de regeneração natural, após a colheita do pinus. Este estudo priorizou os aspectos vinculados a ecologia do solo, caracterizados pelas mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo e pelos ganhos em termos de grupos ligados a funções ecossistêmicas.

O Capítulo 2 amplia o que foi visto no Capítulo 1 pois, demonstra que mudanças na estrutura da comunidade da fauna do solo já estão acontecendo, 4 anos após a retirada do pinus e que, com o passar do tempo seguem as mudanças, com avanços no sentido de recuperação da fauna do solo nas áreas pós-colheita de pinus.

Este estudo também indica que mesmo após 10 anos de regeneração natural das áreas pós-colheita de pinus, é importante seguir monitorando os processos de recuperação da fauna do solo pois, com este tempo de regeneração, as áreas pós-colheita de pinus ainda não alcançaram o patamar de estrutura da comunidade da fauna do solo de áreas de floresta natural.

O trabalho do Capítulo 3, referente a um índice de recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus, é uma proposição de metodológica. Por isso, precisa de ajustes para o seu uso prático em monitoramentos da recuperação da fauna do solo em áreas pós-colheita de pinus.