



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Departamento de Ciências Ambientais



Victor Felipe Lucas

**ESTRUTURA DA MACROFAUNA EDÁFICA EM UMA FLORESTA RIPÁRIA EM
RECUPERAÇÃO NA ZONA RURAL DE SÃO CARLOS, SP**

Setembro de 2024



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Departamento de Ciências Ambientais



Victor Felipe Lucas

**ESTRUTURA DA MACROFAUNA EDÁFICA EM UMA FLORESTA RIPÁRIA EM
RECUPERAÇÃO NA ZONA RURAL DE SÃO CARLOS, SP**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Ciências Ambientais,
UFSCar Campus São Carlos para obtenção do
título: Bacharel em Biotecnologia. Orientador:
Marcel Okamoto Tanaka**

Setembro de 2024

[...] "O homem é parte da natureza, e sua guerra contra a natureza é uma guerra contra si mesmo." [...]

(Rachel Carson em Silent Spring)

Agradecimentos

A Deus, primeiramente, por Sua guia.

À minha querida esposa, Barbara Boni, que esteve ao meu lado em cada passo deste caminho.

Aos meus pais, Josaine Lucas e Jorge Lucas, e à minha irmã, Larissa Siqueira, meu mais profundo agradecimento pelo apoio incondicional, tanto financeiro quanto emocional.

Ao meu orientador, Marcel Tanaka, minha eterna gratidão por me acolher em um momento tão desafiador. Sua orientação, paciência e vasto conhecimento não só enriqueceram minha compreensão da Ecologia, mas também me proporcionaram lições de vida que levarei para sempre. Sentirei saudades das viagens a campo e das longas triagens de material.

Aos colegas do Laboratório de Ecologia de Ecossistemas Ripários pelo apoio e companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus avós, Marilene Martinez e José Martinez (in memoriam), e ao meu tio Willian Martinez, por estarem sempre ao meu lado de forma incondicional. Seu carinho, apoio e palavras de encorajamento me deram forças nos momentos mais difíceis, e por isso sou eternamente grato.

Aos meus queridos sogros, Cláudia Boni e Laydner Boni, e cunhados, Thálita Mendonça, Roberto Mendonça e João Siqueira, pelo apoio incessante, conselhos e incentivos. Sou grato por toda a confiança que depositaram em mim.

Aos meus grandes amigos João Vitor da Silva, Rafael Real e Vitor Torres, por sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida. Aos amigos Afonso Melazzo, Dário Persa, Gustavo Fernando, Matheus Severich e Thomas Zaguetti, por tornarem essa jornada mais leve e divertida. Obrigado pelas risadas, pelos Grupos de Estudos e por todas as histórias que construímos juntos ao longo desses anos. Cada um de vocês fez parte dessa conquista.

À UFSCar e a todos os seus servidores públicos, cujo trabalho dedicado e comprometido fortalece a ciência brasileira e promove o avanço do conhecimento.

1. Resumo

A degradação de florestas tropicais, especialmente em áreas ripárias, compromete a biodiversidade e a capacidade desses ecossistemas de fornecer serviços essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a regulação hídrica. A restauração florestal surge como uma estratégia fundamental para reverter esse quadro, mas a recuperação completa de processos ecológicos requer a reabilitação não apenas da vegetação, mas também da fauna do solo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a estrutura e a diversidade da macrofauna edáfica em uma floresta ripária em recuperação na zona rural de São Carlos, SP, após a implementação de um projeto de restauração ecológica. Para isso, foram realizadas coletas de macroinvertebrados utilizando armadilhas de queda (pitfall traps) em três tipos de uso do solo: pastagem, área em restauração e remanescente florestal. A abundância, riqueza taxonômica e índices ecológicos, como o índice de Shannon e o de dominância de Simpson, foram calculados para comparar as diferentes áreas. Os resultados indicaram maior equitatividade e diversidade nas áreas de floresta remanescente e em restauração em comparação com o pasto, destacando o papel da vegetação no aumento da complexidade do habitat e na recuperação da fauna do solo. A composição da macrofauna edáfica mostrou-se um indicativo sensível da eficácia das práticas de restauração, sugerindo que os macroinvertebrados podem ser usados como bioindicadores para monitorar o sucesso de projetos de restauração ecológica.

Palavras-chave:

Macrofauna edáfica, restauração ecológica, bioindicadores, floresta ripária, biodiversidade do solo.

2. Lista de Ilustrações

Figura 1: Desenho esquemático sobre a área de estudo da zona ripária ao longo do Córrego do Engenho Velho (Página 11).

Figura 2: Número de Indivíduos e Riqueza Estimada (Página 15).

Figura 3: Riqueza Taxonômica e Índice de Shannon (Página 15).

Figura 4: Índice de Dominância de Simpson e Índice de Equitatividade de Pielou (Página 16).

Figura 5: Ordenação por Análise de Escalonamento Multidimensional (Página 19).

3. Lista de Tabelas

Tabela 1: Número de indivíduos e frequência relativa (%) dos grupos de macroinvertebrados (Página 14).

Tabela 2: Resultados da Análise de Variância (Página 18).

Sumário

1. Resumo	4
2. Lista de Ilustrações	5
3. Lista de Tabelas	6
4. Introdução	8
5. Objetivos	10
6. Materiais e métodos	10
6.1 Área de estudo	10
6.2 Coleta de Macroinvertebrados	12
6.3 Análise de dados	12
7. Resultados	13
8. Discussão	19
8.1 Composição estrutural da macrofauna	19
8.2 Influência da vegetação e serapilheira na estrutura e diversidade da fauna em diferentes usos do solo	21
9. Conclusão	23
10. Referências	24

4. Introdução

As florestas tropicais sofrem diversas ameaças que comprometem sua integridade e biodiversidade. Entre os problemas enfrentados estão atividades humanas como extração de madeira, mineração e construção de estradas. Tais atividades não só possuem impacto direto no desmatamento, mas também na degradação destes ecossistemas, abrindo espaço para espécies invasoras, erosão do solo e incêndios florestais, contribuindo para redução da cobertura vegetal (Flores, 2022). Outra problemática são as mudanças climáticas, responsáveis por alterar padrões de precipitação e proporcionar déficits hídricos, que afetam negativamente o crescimento das plantas e a saúde das florestas. Florestas tropicais com menor diversidade funcional e redundância têm se mostrado mais impactadas com as alterações do clima, com menor biomassa acima do solo após eventos extremos influenciando o funcionamento destes ecossistemas (Items *et al.*, 2022).

Desta forma, há grande necessidade de restauração de florestas tropicais, devido ao seu alto valor na provisão de serviços ecossistêmicos (Comín *et al.*, 2018). As florestas provêm serviços essenciais além da conservação da biodiversidade, como a ciclagem de nutrientes e o balanço hídrico, entre outros. Assim, os objetivos da restauração devem incluir não apenas o restabelecimento de cobertura vegetal, mas a recuperação de processos e funções ecossistêmicas que indiquem a capacidade do ecossistema em prover adequadamente os serviços perdidos devido ao desmatamento, incluindo a recuperação da biodiversidade (Shimamoto *et al.*, 2018).

Análises da fauna de solo, especialmente os macroinvertebrados, têm sido empregadas para determinar a saúde desses ecossistemas e o sucesso de projetos de restauração (Brown *et al.*, 2024). Neste contexto, os macroinvertebrados possuem importantes papéis na reciclagem de nutrientes, decomposição de matéria orgânica e estruturação do solo (Lavelle, 2016). Além disso, também atuam como bioindicadores da qualidade do solo, pois são sensíveis a mudanças ambientais (Amazonas *et al.*, 2018; Tuma *et al.*, 2022).

Os macroinvertebrados são organismos visíveis a olho nu, que apresentam grande diversidade de grupos taxonômicos como insetos, aracnídeos, miriápodes, anelídeos e crustáceos, ocupando diversos nichos ecológicos e influenciando a disponibilidade de recursos e condições do solo (Brown *et al.*, 2024). A análise desses organismos permite avaliar a biodiversidade e a funcionalidade do ecossistema, fornecendo dados sobre a recuperação ecológica e a saúde do solo (Brown *et al.*, 2009). Métodos padronizados de coleta, como

armadilhas de queda (pitfall traps), são de baixo custo e minimizam o viés na coleta de dados, fornecendo uma amostra representativa da fauna do solo e capturando uma grande variedade de espécies de forma passiva, principalmente insetos e aracnídeos que se movem pelo solo (Brown *et al.*, 2016; De Aquino *et al.*, 2006).

A análise da riqueza taxonômica e abundância de macroinvertebrados pode revelar padrões importantes sobre o estado de recuperação de áreas degradadas. A fauna edáfica, devido à sua diversidade e à importância das funções que desempenha no solo, pode ser um indicativo do estado de funcionamento dos ecossistemas (Gielbeman *et al.*, 2015). Então, em ecossistemas restaurados, uma maior diversidade de macroinvertebrados é frequentemente associada a uma maior estabilidade e resiliência ecológica, indicando um progresso positivo na recuperação das funções ecológicas (Barnes *et al.*, 2014).

A avaliação e monitoramento contínuo desses parâmetros é, portanto, essencial para monitorar e ajustar estratégias de restauração, visando a recuperação completa e sustentável de ecossistemas degradados (Hale *et al.*, 2018). No entanto, o conhecimento sobre a fauna do solo em áreas de florestas secundárias e sua relação com o processo sucessional ainda é limitado (Machado *et al.*, 2015). Portanto, com base no exposto, este estudo visa analisar as comunidades de macroinvertebrados de solo de uma floresta em recuperação após dez anos de restauração, para avaliar se neste período de tempo as comunidades já se recuperaram em relação às comunidades de remanescentes florestais.

Nós esperamos que, após dez anos de restauração, as comunidades de macroinvertebrados do solo nas áreas em recuperação estejam mais semelhantes às comunidades dos remanescentes florestais. Isso se baseia na expectativa de que, à medida que a vegetação e a estrutura do solo se recuperam, os nichos ecológicos se tornam mais similares aos de ecossistemas florestais maduros, favorecendo a colonização e o estabelecimento de espécies típicas desses ambientes (Hale *et al.*, 2018).

Por outro lado, prevemos que as comunidades de macroinvertebrados nas áreas de pasto degradadas se mantenham significativamente distintas das áreas restauradas e dos remanescentes florestais. A ausência de complexidade estrutural, a baixa diversidade vegetal e a compactação do solo nessas áreas criam condições adversas para a colonização de uma fauna diversificada e funcionalmente rica, resultando em uma menor diversidade e abundância de espécies (Machado *et al.*, 2015).

5. Objetivos

- Comparar a riqueza, abundância e composição taxonômica das comunidades de macroinvertebrados do solo entre áreas de floresta em restauração, remanescentes florestais e áreas de pastagem.
- Avaliar se dez anos de restauração seriam suficientes para as áreas restauradas apresentarem uma convergência na estrutura da comunidade de macroinvertebrados em direção aos remanescentes florestais, assim possivelmente recuperando a diversidade e funções ecossistêmicas relacionadas a este grupo.

6. Materiais e métodos

6.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma pequena propriedade agrícola situada na zona rural de São Carlos, no estado de São Paulo, sudeste do Brasil (21°54'43.569"S e 47°51'37.942"W). O local de estudo, classificado como uma Área de Proteção Permanente (APP), apresenta uma extensão de 200 m de comprimento, paralela a um riacho de baixa ordem. Em fevereiro de 2013, foi implementado um projeto de restauração na área, que anteriormente era um pasto abandonado, sem manejo adequado por um longo período. O projeto incluiu o plantio de 577 mudas e 1154 sementes, que resultou em mais 381 germinações bem-sucedidas, totalizando 958 árvores. Além disso, foram realizadas medidas para restringir o acesso do gado e a remoção química de gramíneas utilizando glifosato (Pestana *et al.*, 2020). As espécies utilizadas são nativas e incluem espécies como Cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), amendoim-bravo (*Pterogyne nitens* Tul.), jequitibá-rosa (*Cariniana legalis* Kuntze), tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), copaíba (*Copaifera langsdorffii*), timbaúva (*Enterolobium timbouva* Mart.), faveira (*Platypodium elegans* Vogel), guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake), e jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) (Macera; Pereira; de Souza, 2017).

Para a realização de coletas, a área de estudo foi dividida em 10 segmentos distribuídos na APP, em cada um dos três tipos de uso do solo: pastagem, área em restauração e floresta remanescente, resultando em 30 parcelas. Vinte e um meses após a introdução das espécies

nativas, foi realizada uma análise química do solo com amostras de 0 a 20 cm de profundidade, coletadas a intervalos regulares de 20 m ao longo da área. A análise revelou um gradiente de fertilidade devido aos nutrientes de um curral próximo. As parcelas mais próximas ao curral apresentaram árvores significativamente mais altas e com maior diâmetro basal em comparação com parcelas mais distantes (Pestana *et al.*, 2020).

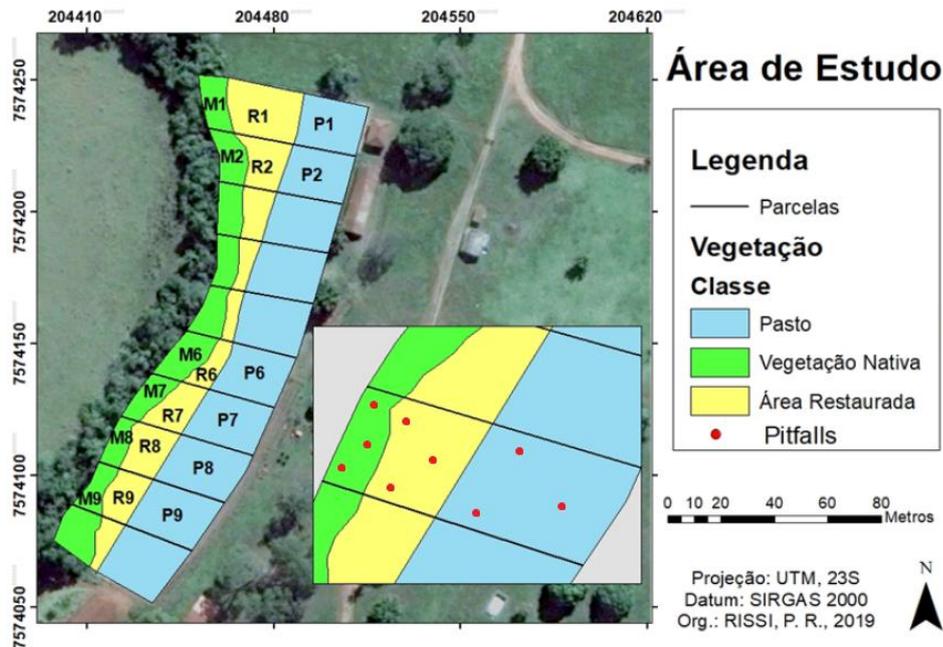


Figura 1. Desenho esquemático sobre a área de estudo da zona ripária ao longo do Córrego do Engenho Velho. O destaque mostra os três tipos de vegetações (vegetação nativa, área restaurada e pasto), as parcelas selecionadas inicialmente por Pestana et al. (2020) e as subamostras (pitfalls) dentro de cada parcela.

Fonte: Pestana et al., 2020 (com alterações).

A formação geológica da área é do tipo Serra Geral, composta por rochas vulcânicas de basalto e arenitos das formações Botucatu-Pirambóia (Sousa Junior; Demattê; Araújo, 2011). O solo da região é classificado como distrófico, apresentando áreas eutróficas com latossolos vermelhos, latossolos vermelho-amarelos e neossolos. A análise da textura do solo revelou uma alta proporção de areia (77,0%), com menores proporções de silte (16,6%) e argila (6,4%) (Rossi, 2017). A localidade apresenta clima tropical (Aw) conforme a classificação de Köppen, caracterizado por invernos secos e verões úmidos, com uma estação chuvosa de outubro a

março. A precipitação média anual é de 1429 mm, com variações entre 1138 mm e 1593 mm, e as temperaturas médias anuais oscilam entre 20 e 25 °C (Rolim *et al.*, 2007).

6.2 Coleta de Macroinvertebrados

Para o estudo da fauna do solo, realizamos uma amostragem em dezembro de 2023 utilizando armadilhas de queda conforme os métodos de Brown e Matthews (2016). Instalamos três armadilhas em três parcelas de cada uma das três regiões distintas — pasto, área de restauração e floresta remanescente — totalizando 27 armadilhas. As armadilhas, feitas de plástico, com 10 cm de profundidade e 9 cm de diâmetro, foram enterradas a pelo menos 2,0 m das bordas de cada parcela. Cada armadilha continha 100 ml de solução de formol a 4% e algumas gotas de detergente para reduzir a tensão superficial, e foram cobertas com uma proteção de 15 cm de diâmetro contra a chuva. As armadilhas foram inicialmente fechadas por sete dias para evitar perturbações na fauna e depois abertas e deixadas no campo por mais sete dias. Após a coleta, as armadilhas foram levadas ao laboratório, onde o conteúdo foi lavado e os artrópodes foram preservados em etanol a 70%. Em seguida, os macroinvertebrados foram classificados de acordo com a classe ou ordem usando um estereomicroscópio (De Almeida *et al.*, 2016), permitindo uma rápida avaliação da biodiversidade ao agrupar os organismos em unidades taxonômicas reconhecíveis.

6.3 Análise de dados

A estrutura das comunidades de macroinvertebrados foi descrita utilizando os seguintes indicadores: abundância total, riqueza taxonômica, índice de dominância de Simpson, índice de diversidade de Shannon, índice de equitabilidade de Pielou (Magurran, 2021), além do estimador de riqueza taxonômica Chao 1, que é independente do esforço de amostragem (Chao; Wang; Jost, 2013). As diferenças entre tipos de uso do solo foram avaliadas usando-se Análise de Variância (ANOVA) de um fator, sendo as diferenças entre tipos analisadas com o teste de comparações múltiplas de Tukey. A composição das comunidades foi analisada com Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) a partir do índice de similaridade de Bray-Curtis, sendo as diferenças entre tipos avaliadas com um modelo de Análise de Variância

Permutacional Multivariada (PERMANOVA) de um fator (Anderson, 2001). As análises foram realizadas com o software PAST 4.16 (Hammer *et al.*, 2001).

Os índices ecológicos foram selecionados por sua capacidade de avaliar diferentes aspectos da estrutura das comunidades. O índice de Shannon foi utilizado para medir a diversidade total, considerando tanto a riqueza quanto a equitatividade das espécies (Magurran, 2021). O índice de dominância de Simpson permitiu identificar a dominância de poucas espécies sobre as demais (Simpson, 1949). Para ajustar possíveis falhas no esforço amostral, o estimador de riqueza Chao 1 foi empregado (Chao, Wang & Jost, 2013), enquanto o índice de equitatividade de Pielou mediu a uniformidade da distribuição das espécies nas diferentes áreas (Pielou, referido por Magurran, 2021).

7. Resultados

Foram encontrados 18 grupos da fauna edáfica, que totalizaram 2.109 macroinvertebrados, sendo 776 indivíduos no pasto, 777 na área de restauração e 556 na mata (Tabela 1). Houve predominância numérica da classe Insecta com 96.4% do total, seguida por Arachnida com 3.08%, Annelida com 0.189%, e as classes Crustacea e Myriapoda, ambas com 0.142%. Dentro da classe Insecta, a ordem mais expressiva foi a Hymenoptera, com 41.6%, em sua maioria representado pela família Formicidae (40.3%).

Tabela 1. Número de indivíduos e frequência relativa (%) dos grupos de macroinvertebrados observados nos diferentes tipos de uso do solo: Pasto, Restauro e Mata.

Táxon	Pasto	Restauro	Mata
Annelida (Haplotaxida)	1 (0.13)	2 (0.26)	2 (0.36)
Arachnida	29 (3.74)	11 (1.42)	25 (4.50)
Blattodea	2 (0.26)	---	2 (0.36)
Coleoptera	52 (6.70)	215 (27.67)	125 (22.48)
Dermaptera	1 (0.13)	1 (0.13)	5 (0.90)
Diptera	29 (3.74)	67 (8.62)	37 (6.65)
Hemiptera	10 (1.29)	21 (2.70)	9 (1.62)
Hymenoptera	7 (0.90)	6 (0.77)	15 (2.70)
Hymenoptera (Formicidae)	454 (58.51)	259 (33.33)	137 (24.64)
Isopoda	---	1 (0.13)	2 (0.36)
Lepidoptera	29 (3.74)	---	4 (0.72)
Myriapoda (Diplopoda)	2 (0.26)	---	1 (0.18)
Odonata	2 (0.26)	1 (0.13)	1 (0.18)
Orthoptera	18 (2.32)	12 (1.54)	32 (5.76)
Phthiraptera	---	---	2 (0.36)
Plecoptera	---	---	1 (0.18)
Siphonaptera	5 (0.64)	---	9 (1.62)
Strepsiptera	4 (0.52)	7 (0.90)	1 (0.18)
Zygentoma (Nicoletiidae)	131 (16.88)	174 (22.39)	146 (26.26)
Total	776 (100)	777 (100)	556 (100)

De acordo com a ANOVA, não foram encontradas diferenças significativas na abundância total, na riqueza taxonômica e nem no estimador de Chao 1 entre os usos do solo (Figura 1, Tabela 2). Entretanto, houve maior dominância de acordo com o índice de Simpson no pasto em relação ao restauro e ao remanescente florestal, resultando em maior equitatividade nestes dois últimos (Figura 3, Tabela 2). Assim, a diversidade estimada pelo índice de Shannon foi menor no pasto e maior no remanescente florestal, enquanto as comunidades do restauro apresentaram valores intermediários (Figura 2).

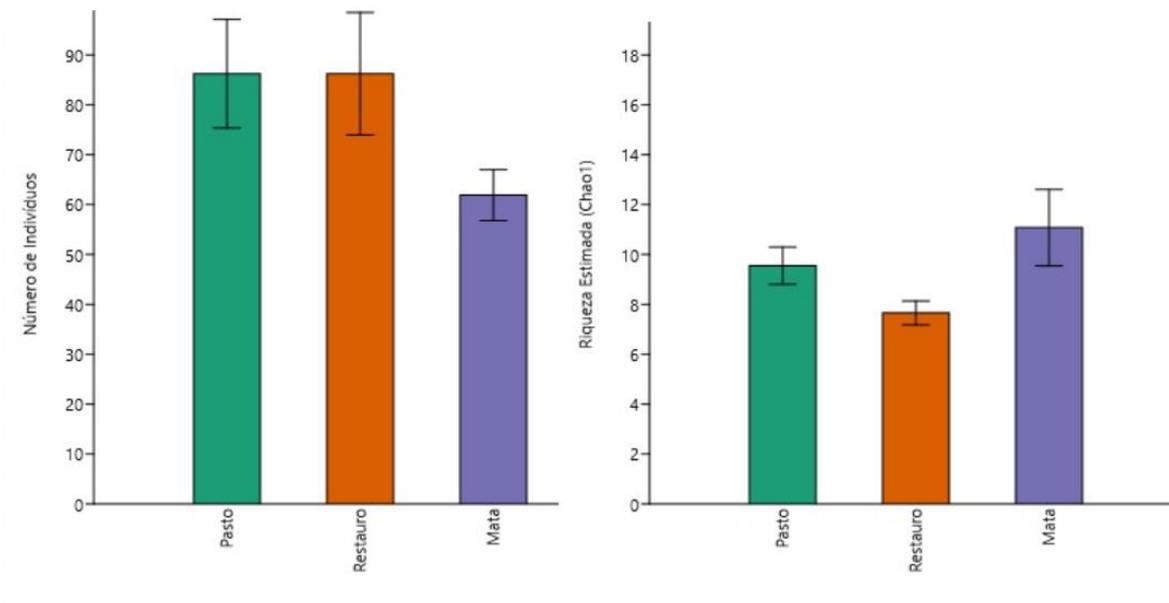


Figura 2. Número de Indivíduos e Riqueza Estimada (Chao 1) das comunidades presentes nos usos do solo: Pasto, Restauero e Mata. As barras indicam a média e erro padrão.

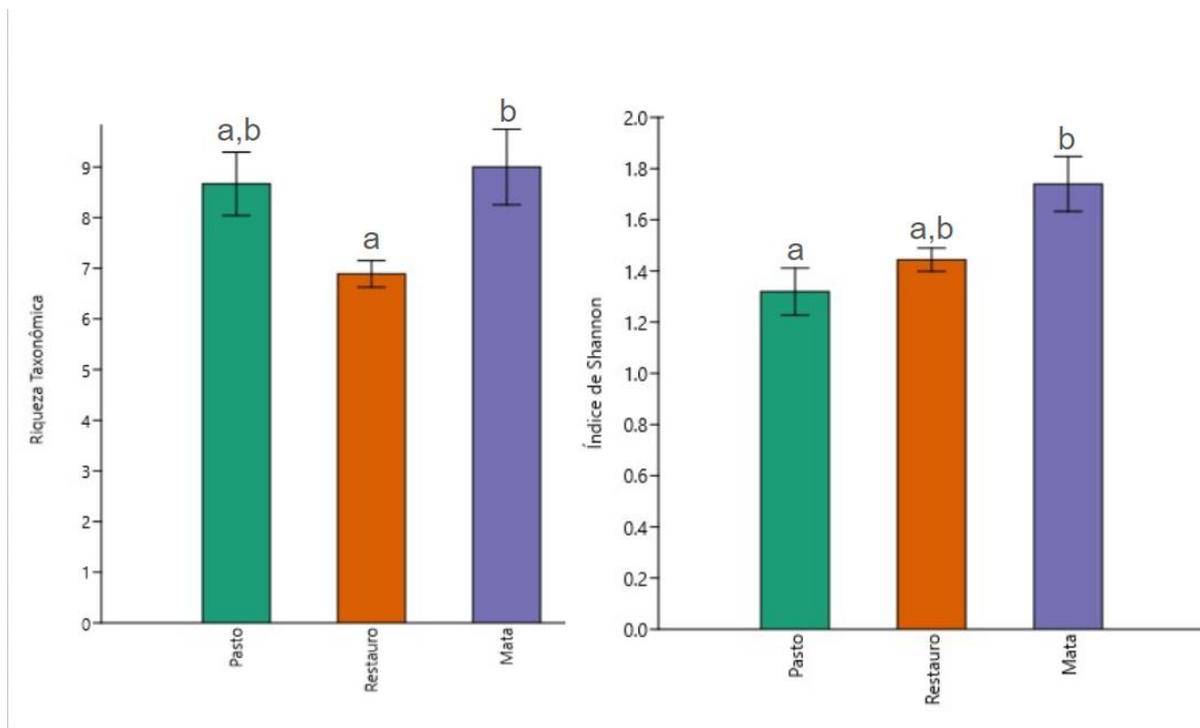


Figura 3. Riqueza Taxonômica e Índice de Shannon das comunidades presentes nos usos do solo: Pasto, Restauero e Mata. As barras indicam a média e erro padrão. Letras iguais indicam médias que não diferem significativamente entre si de acordo com o teste HSD de Tukey.

A análise da abundância total, da riqueza taxonômica e do estimador de Chao 1 não revelou diferenças significativas entre os diferentes tipos de uso do solo (Figura 2). Isso sugere que o número total de indivíduos presentes em cada ambiente estudado, incluindo áreas de pastagem, restauração e remanescente florestal, foi relativamente constante. No entanto, a simples contagem de indivíduos não oferece uma visão completa da estrutura da comunidade ecológica, sendo necessário explorar outros parâmetros, como dominância e equitatividade, para entender melhor as diferenças entre os locais.

Quando se considera o índice de dominância de Simpson, observa-se que a comunidade presente na área de pastagem é dominada por poucos táxons, o que indica menor equitatividade. Isso significa que alguns táxons são altamente prevalentes, enquanto outros estão em menor número, o que resulta em uma comunidade menos equilibrada, em termos de proporção de números de indivíduos. Em contraste, nas áreas de restauração e nos remanescentes florestais, a dominância foi menor, e os táxons estão mais equitativamente distribuídos, com menor predominância de poucos táxons (Figura 3).

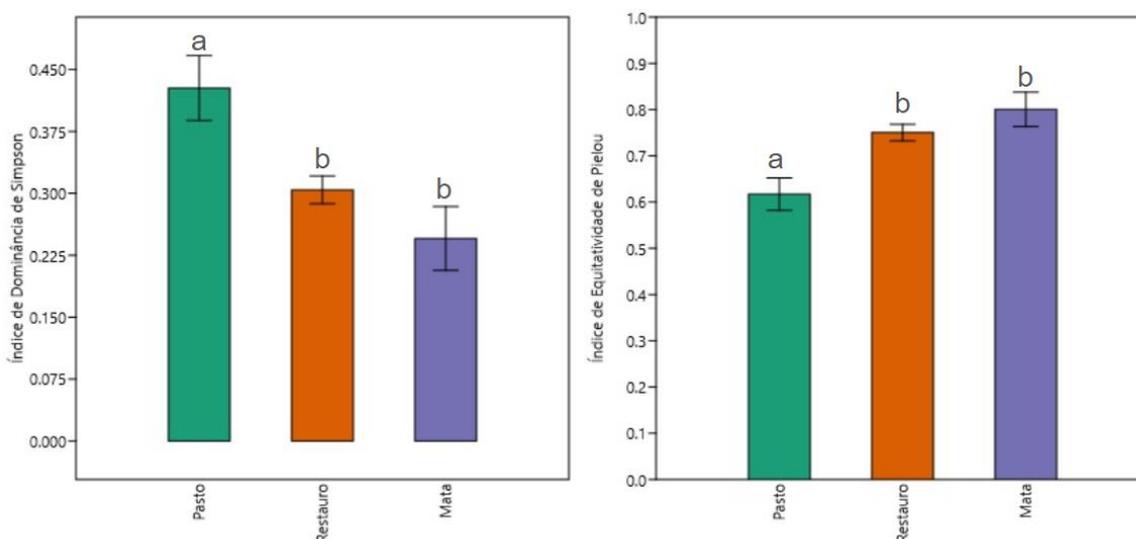


Figura 4. Índice de Dominância de Simpson e Índice de Equitatividade de Pielou das comunidades presentes nos usos do solo: Pasto, RestauRO e Mata. As barras indicam a média e erro padrão. Letras iguais indicam médias que não diferem significativamente entre si de acordo com o teste HSD de Tukey.

Conseqüentemente, o índice de Shannon, que mede a diversidade considerando tanto a riqueza quanto a equitatividade, também refletiu essas diferenças. A diversidade foi menor nas áreas de pastagem, onde a dominância de alguns táxons foi maior, e maior nos remanescentes florestais, onde a comunidade era mais diversa e equilibrada. As áreas de restauração apresentaram valores intermediários, indicando que as práticas de restauração estão, de certa forma, promovendo a recuperação da diversidade, ainda que não ao mesmo nível do remanescente florestal.

A composição das comunidades diferiu entre diferentes usos do solo (PERMANOVA, $gl = 2, 24, Pseudo-F = 5,59, P < 0,001$; Figura 3). As comunidades de pasto foram significativamente diferentes daquelas do restauro (PERMANOVA, $P < 0,05$) e do remanescente florestal ($P < 0,001$), que por sua vez não diferiram entre si ($P > 0,05$). Esses resultados indicam que, embora a abundância total não tenha sido significativamente afetada pelos diferentes usos do solo, a estrutura e a composição das comunidades variaram entre pastagens, áreas de restauração e remanescentes florestais. Assim, a equitatividade e a diversidade refletiram de forma mais sensível às alterações provocadas pelo uso da terra, com implicações para a conservação da biodiversidade e a eficácia das práticas de restauração ecológica.

Tabela 2. Resultados da Análise de Variância comparando os indicadores das comunidades de macroinvertebrados em diferentes usos do solo.

ÍNDICE	FONTE DE VARIAÇÃO	DE	GL	QM	F	P
ABUNDÂNCIA TOTAL	Usos do solo		2	1776.3	2.00	0.150
	Resíduo		24	884.9		
RIQUEZA TAXONÔMICA	Usos do solo		2	11.6	3.82	0.364
	Resíduo		24	3.03		
CHAO 1	Usos do solo		2	26.4	2.82	0.079
	Resíduo		24	9.38		
ÍNDICE DE SHANNON	Usos do solo		2	0.41	6.34	0.006
	Resíduo		24	0.066		
DOMINÂNCIA DE SIMPSON	Usos do solo		2	0.077	7.79	0.002
	Resíduo		24	0.009		
EQUITABILIDADE	Usos do solo		2	0.080	9.17	0.001
	Resíduo		24	0.008		

Ao analisar a Ordenação por Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) observa-se que as comunidades de macroinvertebrados variam significativamente entre os diferentes usos do solo, mas com maior sobreposição das comunidades de restauro e do remanescente (Figura 5). Verifica-se que as áreas de pasto têm uma composição de espécies distinta, possivelmente devido à maior dominância de algumas espécies adaptadas a esse ambiente (Figura 4).

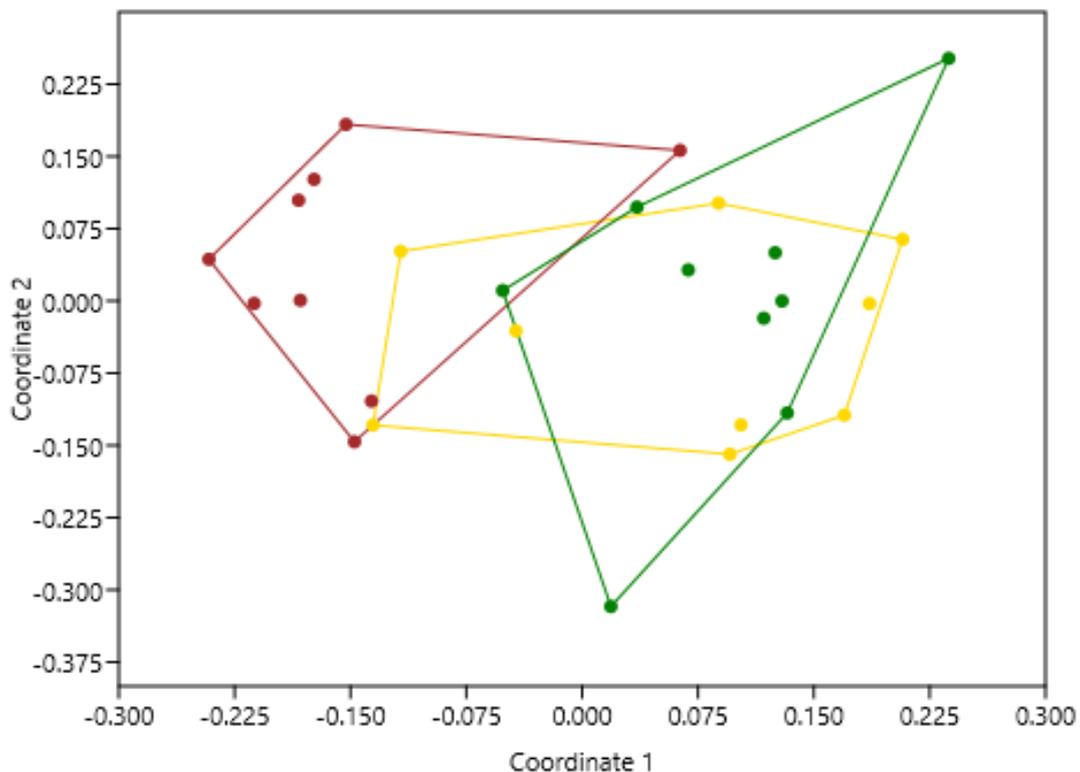


Figura 5. Ordenação por Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) das comunidades de macroinvertebrados de solo no pasto (símbolos vermelho escuro), restauro (símbolos amarelos) e remanescente florestal (símbolos verdes).

8. Discussão

8.1 Composição estrutural da macrofauna

O grupo formado pela ordem Hymenoptera, família Formicidae foi o mais expressivo, especialmente no pasto abandonado, onde representou mais de 50% do total de indivíduos, com menor representação no restauro (33%) e no remanescente florestal (25% do total). Levantamentos de macrofauna têm mostrado a predominância das formigas em uma ampla variedade de habitats, desde áreas bem conservadas até aquelas com diferentes tipos de degradação e variados usos do solo (Guimarães *et al.*, 2021; Souza; Azevedo; 2023). Entre os

insetos, as formigas são vitais para a biodiversidade tropical e desempenham um papel crucial na estruturação de comunidades de invertebrados. Elas são úteis na avaliação ambiental devido à sua ampla distribuição, abundância e facilidade de amostragem (Koch *et al.*, 2024). Além disso, têm um papel ecológico diversificado nos ecossistemas sendo que, baseado em seus hábitos alimentares, os organismos da ordem Hymenoptera podem ser classificados como fitófagos, omnívoros, detritívoros, rizófagos e predadores (Souza; Azevedo; 2023).

O segundo grupo mais representado foi o Zygentoma que, por muito tempo, foi agrupado na antiga Ordem Thysanura, que incluía insetos atualmente distribuídos entre as ordens Archaeognatha e Zygentoma. Embora esses dois grupos apresentem semelhanças, os Zygentoma não possuem a habilidade de saltar e estão mais estreitamente relacionados aos insetos alados, formando, assim, o grupo monofilético Dicondyli (Henriques; Molero-Baltanás; 2024). Alguns lepismatídeos são popularmente conhecidos como traças ou traças-dos-livros. Eles têm distribuição cosmopolita, predominantemente pantropical, sendo frequentemente encontrados em depósitos de livros e revistas. Atualmente, são conhecidas cerca de 650 espécies descritas no mundo, sendo 31 brasileiras (Smith, 2018; Smith; Mitchell; Mesaglio; 2022).

A família Nicoletiidae foi a única deste grupo encontrada no estudo e inclui diversas espécies associadas a ambientes sociais de formigas e cupins, sendo classificadas principalmente como mirmeecófilas (habitantes de ninhos de formigas) ou termitófilas (habitantes de ninhos de cupins). No Brasil, são encontradas espécies com relações ecológicas variadas, como *Atelurina pernambucensis* (termitófila), *Goiasatelura goianensis* (associada a Syntermes), e várias espécies do gênero *Grassiella* que interagem com formigas dos gêneros *Atta*, *Camponotus* e *Myrmicinae* (Smith, 2018). A família apresenta uma ampla distribuição, com registros no Brasil e em outros países da América Latina, e abrange desde ambientes tropicais até áreas subterrâneas (Henriques; Molero-Baltanás; 2024). A biologia da família Nicoletiidae pode explicar sua abundância na coleta dado sua relação de inquilinismo com a família Formicidae, porém, para estabelecer tal relação são necessários novos estudos.

O terceiro grupo mais representado foi a ordem Coleoptera, maior entre os insetos, com cerca de 400 mil espécies registradas no mundo, representando aproximadamente 30% de todos os animais e cerca de 40% de todos os insetos (Fagundes *et al.*, 2011; Stork, 2015). O sucesso desse grupo é atribuído principalmente à presença de élitros endurecidos, à capacidade de consumir uma ampla variedade de materiais e à holometabolia, características que facilitaram a adaptação a diferentes ambientes ao longo de sua evolução (Costa, 2000).

Ainda que o número estimado de táxons tenha sido similar entre os três usos de solo, o grande número de formigas encontrado no pasto em relação ao restauro e mata resultou em forte dominância no pasto e maior diversidade no restauro e no remanescente florestal. Além disso, a composição da fauna também foi similar nestes dois últimos ambientes, com maior diferenciação das amostras do pasto.

8.2 Influência da vegetação e serapilheira na estrutura e diversidade da fauna em diferentes usos do solo

Estudos mostram um aumento na diversidade da fauna edáfica com o decorrer do tempo sucessional, pois o desenvolvimento da vegetação na área de restauração pode contribuir significativamente para melhorar as condições ambientais e aumentar a quantidade e diversidade de recursos disponíveis para a fauna (Daneluz *et al.*, 2021). Entre os benefícios estão a redução da temperatura e da erosão, além do aumento de recursos, retenção de umidade, alimentos e abrigos, favorecidos pela maior complexidade estrutural da vegetação e pelo menor nível de degradação, o que promove o desenvolvimento de organismos no solo (Kooch, 2021).

O efeito positivo da complexidade estrutural da vegetação nas comunidades de organismos do solo foi observado em estudos comparando diferentes formas de manejo do pasto, com maior diversidade resultante da diversificação de culturas agrícolas (Mamabolo *et al.*, 2024). As diferenças entre tipos de vegetação resultantes de diferenças no uso do solo podem influenciar as comunidades de artrópodes tanto devido a diferenças na composição de espécies de plantas quanto ao habitat associado, com influências microclimáticas sobre os organismos (Tobisch *et al.*, 2023). A estrutura da vegetação pode influenciar diretamente o microclima (Jucker *et al.*, 2020), que por sua vez pode limitar a ocorrência e abundância de organismos que diferem quanto a suas tolerâncias ambientais, como formigas (Boyle *et al.*, 2021) e besouros (Williamson *et al.*, 2022).

Além disso, o desenvolvimento de florestas em restauração leva a um aumento na complexidade do habitat, contribuindo para maior diversidade de nichos que podem ser explorados, contribuindo para o aumento da diversidade em trajetórias de sucessão. O aumento na densidade de árvores e desenvolvimento das florestas favorece um aumento na disponibilidade de recursos alimentares e locais de nidificação (Carvalho *et al.*, 2020). Por outro lado, a própria dinâmica da floresta, com a queda de galhos, árvores e outras estruturas pode

contribuir para a diversificação de microhabitats, influenciando a composição das comunidades edáficas (Ohwaki *et al.*, 2023).

Outro fator importante é o acúmulo de folhas em áreas florestais, que amplia a disponibilidade de recursos, especialmente em florestas tropicais, onde fatores climáticos influenciam as taxas de decomposição da serapilheira. A serapilheira desempenha papel crucial na manutenção da fertilidade do solo, transferindo nutrientes das plantas e mantendo o equilíbrio do ecossistema. Além de evitar erosão, ela regula a umidade e a temperatura do solo, favorecendo o desenvolvimento de organismos edáficos e decompositores. A quantidade e qualidade da serapilheira variam conforme o tipo florestal e as condições climáticas, impactando diretamente o ciclo de nutrientes (Bauer *et al.*, 2018).

No desenvolvimento da vegetação, Machado *et al.* (2015) encontraram maior produção de serapilheira e portanto maior aporte de nutrientes em estágios avançados que nos estágios iniciais e intermediários de floresta estacional semidecídua, resultando em maior diversidade e atividade da fauna edáfica. O aporte de nutrientes através da serapilheira é importante para a ciclagem de nutrientes nas florestas, favorecendo o acúmulo de matéria orgânica no solo e contribuindo para a produção secundária (Vohland & Schroth 1999). De fato, em um estudo comparando florestas em restauração no Espírito Santo, Caló *et al.* (2022) verificaram que tanto a fauna epígea quanto indicadores de qualidade do solo foram correlacionados com o acúmulo de serapilheira no solo, que foi maior na floresta nativa quando comparado com as áreas experimentais. Portanto, comunidades de macrofauna de solo têm sido propostas como possíveis bioindicadores para ecossistemas florestais degradados ou em recuperação (Lugo *et al.*, 2024).

Numa revisão recente Parkhurst *et al.* (2021) não encontraram efeitos consistentes do desenvolvimento da vegetação em áreas restauradas quando comparado com ecossistemas de referência, ainda que houvesse melhoria nas condições do solo. Os autores notam que existe grande variação na resposta da fauna, e que mais estudos são necessários para identificar sob quais condições há uma recuperação da diversidade da fauna edáfica. Os resultados encontrados no presente estudo indicam que a macrofauna edáfica respondeu ao projeto de restauração pelo menos em relação à equitatividade e diversidade, com alterações concomitantes da composição quando comparado com o pasto. Outros estudos mais recentes (e.g., Lugo *et al.* 2024) também encontraram diferenças nas comunidades de macroinvertebrados relacionadas a diferenças no uso do solo, em sistemas temperados, subtropicais e tropicais. Desta forma, a restauração da floresta ripária contribuiu para a recuperação da macrofauna, possivelmente com o

desenvolvimento da complexidade estrutural e do aumento dos recursos disponíveis ao longo da sucessão ecológica estabelecida.

9. Conclusão

Este trabalho mostrou que a estrutura e diversidade da macrofauna edáfica são diretamente influenciadas pelas condições ambientais e pelo uso do solo. A dominância das formigas no pasto, contrastando com a maior diversidade observada no restauro e no remanescente florestal, reflete as diferenças na complexidade da vegetação e na disponibilidade de recursos. O desenvolvimento da vegetação do restauro e o acúmulo de serapilheira em áreas florestais restauradas desempenham um papel fundamental na disponibilização de recursos e habitats mais favoráveis ao aumento da biodiversidade. Esses resultados destacam a importância de práticas de restauração e manejo adequado para a conservação da fauna e a sustentabilidade dos ecossistemas florestais, assim como a efetividade da macrofauna de solo como bioindicadores de qualidade ambiental.

10. Referências

- ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. **Austral Ecology**, v. 26, p. 32–46, 2001.
- AMAZONAS, N. T. *et al.* Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 78, n. 3, p. 449–456, 2018.
- BARNES, Andrew D. *et al.* Consequences of tropical land use for multitrophic biodiversity and ecosystem functioning. **Nature Communications**, [s. l.], v. 5, p. 1–7, 2014.
- BAUER, Danielle *et al.* Acúmulo De Serapilheira Em Fragmentos Da Floresta Atlântica Subtropical. [s. l.], p. 119–130, 2018.
- BOYLE, M. J. *et al.* Localised climate change defines ant communities in human-modified tropical landscapes. **Functional Ecology**, v. 35, n. 5, p. 1094–1108, 2021.
- BROWN, George G. *et al.* Soil macrofauna communities in Brazilian land-use systems. **Biodiversity Data Journal**, [s. l.], v. 12, 2024.
- BROWN, George G.; MASCHIO, Wagner; FROUFE, Luís Cláudio Maranhão. Macrofauna do solo em sistemas agroflorestais e Mata Atlântica em regeneração nos municípios de Barra do Turvo-SP e Adrianópolis. **DOCUMENTOS 184 - Embrapa**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2009.
- BROWN, Grant R.; MATTHEWS, Iain M. A review of extensive variation in the design of pitfall traps and a proposal for a standard pitfall trap design for monitoring ground-active arthropod biodiversity. **Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 6, n. 12, p. 3953–3964, 2016.
- CALÓ, L. O. *et al.* Epigeal fauna and edaphic properties as possible soil quality indicators in forest restoration areas in Espírito Santo, Brazil. **Acta Oecologica**, v. 117, p. 103870, 2022.
- CHAO, Anne; WANG, Y. T.; JOST, Lou. Entropy and the species accumulation curve: A novel entropy estimator via discovery rates of new species. **Methods in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. 1091–1100, 2013.
- COMÍN, Francisco A. *et al.* Prioritizing sites for ecological restoration based on ecosystem services. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 1155–1163, 2018.
- COSTA, Cleide. Estado de conocimiento de los Coleoptera neotropicales. **Taller Iberoamericano de Entomología Sistemática**, 1er. Tradução . Zaragoza: Sociedad

Entomologica Aragonesa, 2000.

DANELUZ, Débora; SILVA, Jéssica Camile da; KUBIAK, Ketrin Lorhayne; ZARZYCKI, Luis Felipe Wille; TESSARO, Dinéia. **Macrofauna epiedáfica associada a solos submetidos a diferentes usos**. Dois Vizinhos: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2021.

DE ALMEIDA, M C *et al.* **Insetos De Importância Econômica: Guia Ilustrado para identificação de famílias**. [S. l.]: FEPAF, 2016. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=Z2F_tQAACAAJ.

DE AQUINO, M A; AGUIAR-MENEZES, E de L; DE QUEIROZ, J M. Recomendações para coleta de artrópodes terrestres por armadilhas de queda (“Pitfall-traps”). **Circular Técnica**, [s. l.], v. 18, n. December, p. 1–8, 2006.

DECAËNS, T. *et al.* The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, [s. l.], v. 42, n. SUPPL. 1, 2006.

FAGUNDES, CK *et al.* Diversity of the families of Coleoptera captured with pitfall traps in five different environments in Santa Maria, RS, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, [s. l.], v. 71, n. 2, p. 381–390, 2011.

DUFRENE, M.; LEGENDRE, P. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. **Ecological Monographs**, v. 67, p. 345-366, 1997.

FLORES, Bernardo M.; STAAL, Arie. Feedback in tropical forests of the Anthropocene. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 17, p. 5041–5061, 2022.

GUIMARÃES, Nathalia de França *et al.* Fauna do solo associada a diferentes sistemas de cultivo. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. e54610212787, 2021.

GIEBELMAN, U. C. *et al.* Diversity and ecosystem functioning: litter decomposition dynamics in the Atlantic Rainforest. **Applied Soil Ecology**, v. 46, p. 283-290, 2010.

HALE, Robin *et al.* Assessing changes in structural vegetation and soil properties following riparian restoration. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 252, n. May 2017, p. 22–29, 2018.

HENRIQUES, Augusto L.; MOLERO-BALTANÁS, Rafael. Capítulo 13: Zygentoma Börner, 1904. **Insetos do Brasil: Diversidade e Taxonomia**, [s. l.], n. January, p. 170–173, 2024.

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, p. 9, 2001.
- ITEMS, Reuse *et al.* Functional susceptibility of tropical forests to climate change. **Nature Ecology** [*s. l.*], 2022.
- JUCKER, T. *et al.* A research agenda for microclimate ecology in human-modified tropical forests. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, p. 92, 2020.
- KOCH, Elmo Borges A. *et al.* Contribution of Omnidirectional Flight Traps to Assess the Ant (Hymenoptera: Formicidae) Diversity in an Agroforestry System. **Sociobiology**, [*s. l.*], v. 71, n. 2, p. e9827, 2024.
- KOOCH, Yahya; AZIZI MEHR, Milad; HOSSEINI, Seyed Mohsen. Soil biota and fertility along a gradient of forest degradation in a temperate ecosystem. **Catena**, [*s. l.*], v. 204, n. April, p. 105428, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105428>.
- LAVELLE, Patrick *et al.* Soil macroinvertebrate communities: A world-wide assessment. **Global Ecology and Biogeography**, [*s. l.*], v. 31, n. 7, p. 1261–1276, 2022.
- LAVELLE, Patrick. FIELD MANUAL Technical level. [*s. l.*], n. February 2014, 2008.
- LAVELLE, Patrick *et al.* Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, [*s. l.*], v. 42, n. SUPPL. 1, 2006.
- LAVELLE, Patrick *et al.* Ecosystem engineers in a self-organized soil: A review of concepts and future research questions. **Soil Science**, [*s. l.*], v. 181, n. 3–4, p. 91–109, 2016.
- LUGO, E. H.; IBÁÑEZ, E. V.; LAVELLE, P. A global indicator of soil macroinvertebrate community composition, abundance and diversity. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105138, 2024.
- MACERA, Leonardo Gallo; PEREIRA, Silvia Rahe; DE SOUZA, Andréa Lúcia Teixeira. Survival and growth of tree seedlings as a function of seed size in a gallery forest under restoration. **Acta Botanica Brasilica**, [*s. l.*], v. 31, n. 4, p. 539–545, 2017.
- MACHADO, Deivid Lopes *et al.* Fauna Edáfica na Dinâmica sucessional da mata Atlântica em floresta estacional semidecidual na bacia do Rio Paraíba do Sul-RJ. **Ciência Florestal**, [*s. l.*], v. 25, n. 1, p. 91–106, 2015.
- MAGURRAN, Anne E. Measuring biological diversity. **Current Biology**, [*s. l.*], v. 31, n. 19, p. R1174–R1177, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2021.07.049>.
- MAMABOLO, E.; PRYKE, J. S.; GAIGHER, R. Soil fauna diversity is enhanced by vegetation

complexity and no-till planting in regenerative agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 367, p. 108973, 2024.

PARKHURST, T. et al. Global meta-analysis reveals incomplete recovery of soil conditions and invertebrate assemblages after ecological restoration in agricultural landscapes. **Journal of Applied Ecology**, v. 59, n. 2, p. 358-372, 2022.

PESTANA, Luís Fernando de Abreu *et al.* Interactive effects between vegetation structure and soil fertility on tropical ground-dwelling arthropod assemblages. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 155, n. April, p. 103624, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103624>.

ROLIM, Galuco de Souza *et al.* Classificação climática de Kppen e Thorntwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para SP. **Bragantia**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 711–720, 2007.

ROSSI, Marcio. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. [S. l.: s. n.], 2017.

SHIMAMOTO, Carolina Y. *et al.* Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 1–16, 2018.

SMITH, Graeme B.; MITCHELL, Andrew; MESAGLIO, Thomas. Two New Australian Silverfish (Zygentoma: Lepismatidae: Ctenolepismatinae and Nicoletiidae: Subnicoletiinae). **Records of the Australian Museum**, [s. l.], v. 74, n. 2, p. 59–74, 2022.

SMITH, Graeme B. The contribution of silverfish (Insecta: Zygentoma) to Australian invertebrate biodiversity and endemism. **Ph.D. thesis**. Federation University, Ballarat, Australia, 432 pp., 2018.

SIMPSON, E H. Measurement of Diversity. **Nature**, [s. l.], v. 163, n. 4148, p. 688, 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/163688a0>.

STORK, N. E.; McBROOM, J.; GELY, C.; HAMILTON, A. J. New approaches narrow global species estimates for beetles, insects, and terrestrial arthropods. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 112, n. 24, p. 7519–7523, 2015.

SOUSA JUNIOR, José Geraldo; DEMATTÊ, José A. M; ARAÚJO, Suzana Romeiro. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores de atributos dos solos: potencial e custos. **Bragantia**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 610–621, 2011.

- SOUSA, José Paulo *et al.* Changes in Collembola richness and diversity along a gradient of land-use intensity: A pan European study. **Pedobiologia**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 147–156, 2006.
- SOUZA, Werônica Meira de; AZEVEDO, Pedro Vieira. Levantamento de grupos da macrofauna epígea em área cultivada com capim-elefante. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 06, p. 1275–1291, 2023.
- TUMA, J., Frouz, J., Veselá, H., Křivohlavý, F., & Fayle, T. M. The impacts of tropical mound-building social insects on soil properties vary between taxa and with anthropogenic habitat change. **Applied Soil Ecology**, 179, 104576, 2022.
- TOBISCH, C. et al. Plant species composition and local habitat conditions as primary determinants of terrestrial arthropod assemblages. **Oecologia**, v. 201, n. 3, p. 813-825, 2023.
- VOHLAND, K.; SCHROTH, G. Distribution patterns of the litter macrofauna in agroforestry and monoculture plantations in central Amazonia as affected by plant species and management. **Applied Soil Ecology**, v. 13, n. 1, p. 57-68, 1999.
- WILLIAMSON, J. et al. Local-scale temperature gradients driven by human disturbance shape the physiological and morphological traits of dung beetle communities in a Bornean oil palm–forest mosaic. **Functional Ecology**, v. 36, n. 7, p. 1655-1667, 2022.